



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING TESTING

**VYUŽITÍ NEDESTRUKTIVNÍCH A DESTRUKTIVNÍCH
ZKUŠEBNÍCH METOD PRO URČENÍ PEVNOSTI
BETONU V TLAKU**

THE USE OF NON-DESTRUCTIVE AND DESTRUCTIVE TESTING METHODS FOR THE
DETERMINATION OF THE COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

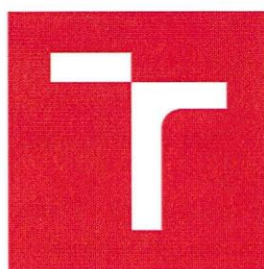
Petr Fučík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DALIBOR KOCÁB, Ph.D.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavebního zkušebnictví

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Petr Fučík
Název	Využití nedestruktivních a destruktivních zkušebních metod pro určení pevnosti betonu v tlaku
Vedoucí práce	Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2016
Datum odevzdání	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

doc. Ing. Pavel Schmid, Ph.D.
Vedoucí ústavu



prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Schmid, P. a kol.: Základy zkušebnictví. Brno, CERM, 2001.
Cíkrle, P. a kol.: NDT zkoušení ve stavebnictví. Příručka kurzu ČŽV. VUT v Brně, 2010.
Anton, O. a kol.: Základy zkušebnictví. Brno, CERM, 2002.
Neville, A.M.: Properties of concrete.
Newman, J.: Advanced concrete technology – Concrete Properties.
Proceq, manuál k přístroji SilverSchmidt PC-N a SilverSchmidt PC-L.
Odborné tuzemské i zahraniční články pojednávající o zadané problematice.
Všechny tč. platné normy, zejména s přihlédnutím k ČSN EN 206, ČSN EN 1992-1-1, ČSN EN 12504-1, ČSN EN 12504-2, ČSN 73 1373, ČSN EN 13791, ČSN 73 2011.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Teoretická část: Rešerše pramenů – beton a jeho vlastnosti, především pevnost betonu v tlaku. Dále problematika nedestruktivního zkoušení betonu, možnosti ověřování pevnosti v tlaku betonu ve stávajících konstrukcích s přihlédnutím k NDT metodám. Popis použitých metod zkoušení betonu a jejich princip, vztah mezi tvrdostí a pevností v tlaku, zpracování přehledu metodik zkoušení podle různých předpisů – ČSN 73 2011, ČSN EN 13791.
Praktická část: Zpracování plánu experimentu. Provedení tvrdoměrných zkoušek pomocí různých typů Schmidtova tvrdoměru na betonových zkušebních tělesech a určení pevnosti v tlaku na vývrtech z těchto zkušebních těles. Vyhodnocení výsledků zkoušek, tabelární a grafické zpracování výsledků zkoušek a sepsání vyplývajících závěrů. Vytvoření regresní závislosti mezi výsledky NDT zkoušení a pevností betonu v tlaku.
Práci se zkušebními lisy a zařízeními provede osoba k tomu oprávněná.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá řešerší tvrdoměrných metod, jejich principů a druhů použitých přístrojů pro nedestruktivní tvrdoměrné měření včetně nejnovějších přístrojů a jejich popisu. Jsou popsány základní vztahy mezi tvrdostí a pevností a také postupy pro získání pevnosti betonu v tlaku v konstrukci. Je zpracován přehled metodik zkoušení podle dvou normativních přístupů zpracování a vyhodnocení. V experimentální části se práce zabývá měřením na betonových dílcích pomocí přístrojů OriginalSchmidt typ N, SilverSchmidt typ N a SilverSchmidt typ L, zkoušek pevnosti betonu v tlaku na jádrových vývrtech a tvorby regresních závislostí z těchto hodnot.

KLÍČOVÁ SLOVA

Nedestruktivní zkouška, beton, tvrdoměrné zkoušení, OriginalSchmidt, SilverSchmidt, regresní závislost, pevnost betonu v tlaku, jádrový vývrt.

ABSTRACT

This thesis deals with the summary of hardness test methods, their principles and types of devices used for nondestructive measurement of hardness test, including the latest devices and their description. It describes the basic relationship between hardness and compressive strength as well as procedures for obtaining the compressive strength of concrete in the structure. It provides an overview of testing methods by two normative approaches of processing and evaluation. The experimental part deals with the measurement on concrete parts using devices OriginalSchmidt type N, SilverSchmidt type N and SilverSchmidt type L, testing concrete compressive strength on cores and development of regression curve of these values.

KEYWORDS

Non-destructive test, concrete, hardness testing, OriginalSchmidt, SilverSchmidt, regression curve, compressive strength of concrete, drilled core.

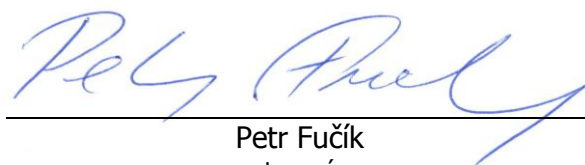
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Petr Fučík *Využití nedestruktivních a destruktivních zkušebních metod pro určení pevnosti betonu v tlaku*. Brno, 2017. 61 s., 0 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24. 5. 2017



Petr Fučík
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Daliboru Kocábovi, Ph.D. a také Ing. Petru Cikrlovi, Ph.D. za pedagogickou a odbornou pomoc a jejich cenné rady při zpracování mé bakalářské práce a při provádění zkoušek a statistických vyhodnocení.

Bakalářská práce vznikla v rámci řešení projektu GAČR 13-18870S „Hodnocení a predikce trvanlivosti povrchové vrstvy betonu“.

V Brně dne 24. 5. 2017

OBSAH

1	ÚVODNÍ ČÁST.....	10
1.1	ÚVOD.....	10
1.2	CÍLE PRÁCE.....	12
2	TEORIE TVRDOMĚRNÉHO ZKOUŠENÍ BETONU.....	13
2.1	ZÁKLADNÍ POJMY NEDESTRUKTIVNÍHO ZKOUŠENÍ BETONU	13
2.1.1	<i>Nedestruktivní zkoušení betonu</i>	<i>13</i>
2.1.2	<i>Nedestruktivní zkouška</i>	<i>13</i>
2.1.3	<i>Tvrdost.....</i>	<i>13</i>
2.1.4	<i>Pevnost</i>	<i>13</i>
2.1.5	<i>Vztah tvrdosti a pevnosti</i>	<i>14</i>
2.1.6	<i>Tzv. kalibrační vztahy.....</i>	<i>14</i>
2.2	TVRDOMĚRNÉ METODY A JEJICH ROZDĚLENÍ	15
2.2.1	<i>Vrypová metoda.....</i>	<i>15</i>
2.2.2	<i>Vtiskové metody.....</i>	<i>15</i>
2.2.3	<i>Vnikací metody</i>	<i>16</i>
2.2.4	<i>Odrazové metody.....</i>	<i>16</i>
2.3	POSTUPY PRO ZÍSKÁVÁNÍ PEVNOSTI BETONU V TLAKU.....	16
2.4	PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ TVRDOSTI BETONŮ.....	17
2.4.1	<i>Odrazový tvrdoměr OriginalSchmidt</i>	<i>17</i>
2.4.2	<i>Odrazový tvrdoměr SilverSchmidt.....</i>	<i>18</i>
2.4.3	<i>Odrazový tvrdoměr DigiSchmidt.....</i>	<i>19</i>
2.4.4	<i>Tvrdoměr Schmidt OS - 120</i>	<i>19</i>
2.5	VÝVOJ TVRDOMĚRNÝCH METOD PRO ZKOUŠENÍ BETONU A NEJNOVĚJŠÍ PŘÍSTROJE ...	20
2.5.1	<i>Popis přístroje SilverSchmidt.....</i>	<i>21</i>
2.5.2	<i>Přehled použití přístrojů s ohledem na rozsah pevnosti betonu v tlaku.....</i>	<i>22</i>
2.5.3	<i>Kalibrační křivky pro přístroje SilverSchmidt</i>	<i>22</i>
3	METODIKY ZKOUŠENÍ PODLE RŮZNÝCH PŘEDPISŮ	27
3.1	ŘADA NOREM ČSN EN	27
3.1.1	<i>Podstata zkoušky</i>	<i>27</i>
3.1.2	<i>Zkušební zařízení.....</i>	<i>28</i>
3.1.3	<i>Zkušební plocha.....</i>	<i>28</i>
3.1.4	<i>Zkušební postup.....</i>	<i>28</i>
3.1.5	<i>Výsledek zkoušky</i>	<i>29</i>
3.1.6	<i>Vyhodnocení zkoušky.....</i>	<i>29</i>

3.1.7	Alternativa 1 – Přímá korelace s vývrty	29
3.1.8	Alternativa 2 – Kalibrace s vývrty pro vymezený rozsah pevnosti betonu v tlaku použitím stanoveného vztahu	30
3.2	ŘADA NOREM ČSN	32
3.2.1	Podstata zkoušky	32
3.2.2	Zkušební zařízení	32
3.2.3	Zkušební místa	32
3.2.4	Zkušební postup	33
3.2.5	Výsledek zkoušky	33
3.2.6	Vyhodnocení zkoušky	34
3.2.7	Pevnost betonu v tlaku s nezaručenou přesností	34
3.2.8	Pevnost betonu v tlaku upřesněná	35
3.3	POROVNÁNÍ NORMATIVNÍCH PŘÍSTUPŮ A KALIBRAČNÍCH KŘIVEK DLE NOREM	36
4	TVRDOMĚRNÉ MĚŘENÍ NA BETONOVÝCH DÍLCÍCH	38
4.1	POSTUP	39
4.1.1	Příprava bloků	39
4.1.2	Měření	39
4.1.3	Charakteristická pevnost betonu v tlaku na jádrových vývrtech	43
4.2	TVORBA GRAFŮ REGRESNÍ ZÁVISLOSTI	47
4.2.1	Original Schmidt typ N	48
4.2.2	SilverSchmidt typ N	48
4.2.3	SilverSchmidt typ L	49
4.3	REGRESNÍ ZÁVISLOST VYTVOŘENÁ Z PRŮMĚRNÝCH HODNOT VÝSLEDKŮ	49
4.3.1	OriginalSchmidt typ N	50
4.3.2	SilverSchmidt typ N	50
4.3.3	SilverSchmidt typ L	51
4.4	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	51
4.4.1	Original Schmidt typ N	52
4.4.2	SilverSchmidt typ N	53
4.4.3	SilverSchmidt typ L	54
5	ZÁVĚR	55
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	56
6.1	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK	58
6.2	SEZNAM OBRÁZKŮ	60
6.3	SEZNAM TABULEK	61

1 ÚVODNÍ ČÁST

1.1 ÚVOD

V dnešní době moderního stavebnictví a architektury se beton stává prostředkem, který je čím dál více populární pro svoje stavební vlastnosti, ale také pro jeho čistotu a estetičnost. Používáme ho na výstavbu nosných skeletů, výrobu panelů, v dopravním stavitelství je hlavním materiálem pro výstavbu mostů, vozovek dálnic a používá se také jako výztuž u staveb podzemních. Používá se pro výstavbu na suchu i pod vodou, z důvodu jeho stálých vlastností. Jeho historie sahá až ke kořenům starověkých Římanů a od té doby se stal nedílnou součástí výstavby hlavně na evropském kontinentu, ale také ve světě. V České Republice se datují začátky využívání betonu k roku 1912 [14].

Od prvorepublikového používání do základů domů se beton dostal do většího povědomí veřejnosti ve spojitosti se vzdušnými a světlými stavbami z období funkcionalismu, kde byl tento materiál ve velké míře využit. V meziválečném období ho využívala řada architektů a začala se tvořit představa, že beton má stejně jako kámen neomezenou životnost. Po válce se v rámci obnovy památek a usilovného budování začala s obdivem k možnostem betonu z třicátých let stavět řada staveb, které měly mnohem nižší technologickou úroveň.

Proces stárnutí a trvanlivosti nebyl v návrhu projektů vůbec zohledněn. Jeho hrubý a drsný povrch, výstavba ve špatném prostředí přispěla ke ztrátě reputace tohoto stavebního materiálu, ke které došlo v druhé polovině 70. let. Týkalo se to převážně konstrukcí v oblasti pozemních staveb. Výjimkou však bylo odvětví prefabrikace a prefabrikovaných mostních nosníků. Trvanlivosti také nepřispěly požadavky na úsporu materiálu a s tím spojenou menší tloušťku krycí vrstvy výztuže z důvodu zmenšení statické výšky průřezu. Po karbonataci betonu a ztrátě pasivačních schopností docházelo ke korozi výztuže. Všechny tyto stavby musely být později vhodnými způsoby sanovány. Po tomto útlumu nastalo v 90. letech 20. století opět ve stavebnictví jeho nové oživení, za kterým stojí zejména vývoj nových technologií a výzkumů jeho jednotlivých složek od počátku přípravy, přes výstavbu až po stárnutí konstrukce, vystavené mechanickým, chemickým, nebo tepelným zatížením [14].

Podařilo se objasnit projevy a příčiny degradace betonu a na jejich základě měnit technologie a proces návrhu tak, aby bylo možno stavět na dlouhou dobu životnosti. Abychom si vlastnosti betonu mohli ověřit, provádíme za tímto účelem kontrolu jakosti.

Kontrola jakosti prokazuje vlastnosti betonové směsi a betonu a je podkladem pro vypracování technologického předpisu. Skládá z odběru vzorků, výroby těles a samotných zkoušek, které se dělí na destruktivní a nedestruktivní.

Nedestruktivní metody jsou v současné době v největším rozsahu používány při vyšetřování betonových konstrukcí a při jejich průběhu těleso nebo konstrukci nepoškodíme. Jejich nevýhodou je stanovení hodnot pevnosti betonu nepřímou, proto je nutné zjišťovat hodnoty různými způsoby. Hodnoty odvozujeme na základě jiných zjištěných vlastností betonu, například tvrdosti.

Tvrdost je jednou ze základních a poměrně snadno zjistitelných vlastností materiálů užívaných ve stavebnictví a má významný vliv na odolnost proti opotřebení. Tvrdoměrné zkoušky patří mezi jedny z nejrozšířenějších nedestruktivních zkoušek stavebních materiálů. Hodnoty požadovaných vlastností z tvrdoměrných zkoušek zjistíme za pomoci korelačních vztahů. U betonových konstrukcí je můžeme použít pro zjištění pevností betonu v tlaku, modulu pružnosti, rovnoměrnosti betonu nebo také vyhledávání porušení betonové konstrukce [2].

K tvrdoměrnému měření jsou používány různé typy přístrojů a postupů, kterými se bude tato bakalářská práce zabývat. Neexistuje ale přesný vztah mezi jednotlivými stupnicemi a hodnotami. Tvrdost je bohužel obtížné přesně a jednoduše popsat, protože závisí na komplexních vlastnostech zkoušeného vzorku a také na zkušebních podmínkách, při kterých je měření prováděno. Dalším problémem je i to, že při zkouškách tvrdosti zkoumáme pouze povrchovou vrstvu, která se může vyznačovat jinými vlastnostmi, než zbytek celé konstrukce.

Je nutné se také zaměřit na nové přístroje a postupy v tvrdoměrném zkoušení z důvodu z důvodu jejich provádění a následného vyhodnocování.

1.2 CÍLE PRÁCE

Cíle této bakalářské práce se dělí na dvě hlediska. V teoretické části je cílem se seznámit se základními principy metod a druhy tvrdoměrných přístrojů včetně zpracování přehledu metodik zkoušení dle různých předpisů.

Praktická část se zaměří na provedení tvrdoměrných měření a stanovení pevnosti betonu v tlaku na zkušebních betonových vzorcích, tabelární a grafické vyhodnocení výsledků a vytvoření kalibračních vztahů pro pevnost v tlaku z tvrdoměrného měření.

2 TEORIE TVRDOMĚRNÉHO ZKOUŠENÍ BETONU

2.1 Základní pojmy nedestruktivního zkoušení betonu

2.1.1 Nedestruktivní zkoušení betonu

Je to zkoušení betonu, na zkušebních tělesech, konstrukcích nebo dílcích, při kterém nedojde k porušení betonu nebo jen k takovému porušení, kdy jeho statická funkce není dotčena [1].

2.1.2 Nedestruktivní zkouška

Je souhrn postupů, zahrnujících přípravu měření, měření nedestruktivní metodou a vyhodnocení měření, dle potřeby doplněný měřením a zkoušením na porovnávacích zkušebních tělesech nebo doplňkovými zkouškami. Výsledek nedestruktivní zkoušky na jednom zkušebním místě odpovídá výsledku zkoušky provedené jinou, např. destruktivní metodou na jednom zkušebním tělese [2].

2.1.3 Tvrdost

Tvrdost je určena odporem zkoušeného materiálu proti tvárné (plastické) deformaci materiálu. Nelze však hodnotu tvrdosti definovat jako fyzikální veličinu i přes velké uplatnění tvrdoměrných zkoušek. Zjišťuje se mnoha metodami, které poskytují pro jeden materiál různé hodnoty tvrdostí [3].

2.1.4 Pevnost

Pevnost je jednou z nejdůležitějších vlastností stavebních materiálů. Vyjadřuje se jako poměr síly při porušení vzorku ku zatěžované ploše. Charakteristická pevnost f_{ck} vyjadřuje hodnotu, pro kterou bude pouze 5% hodnot všech možných výsledků zkoušek nižší, takzvaný 5% kvantil. Charakteristická krychelná pevnost, zjištěná na zkušebních krychlích se značí $f_{ck,cube}$ a pevnost stanovená na zkušebních válcích $f_{ck,cyl}$ [4].

2.1.5 Vztah tvrdosti a pevnosti

Obecně nelze specifikovat vztah mezi zjištěnou tvrdostí a jinými mechanickými veličinami, např. pevností. Přesto u řady metod, při nichž se měří tvrdost, existují tzv. *kalibrační vztahy*, vyjadřující vztah stanovené tvrdosti k příslušné pevnosti. Takto stanovené pevnosti mají většinou charakter pouze nezaručených pevností [3].

2.1.6 Tzv. kalibrační vztahy

Termín „kalibrační vztah“ je v kontextu, jak jej uvádí např. norma ČSN 73 1370 [1], nesprávně použitý. Závislost určité charakteristiky materiálu, např. pevnosti betonu v tlaku, na NDT parametru není možné z pohledu statistiky nazývat „kalibračním vztahem“. Jediný správný termín této závislosti neexistuje, nejčastěji používaný termín je „regresní závislost“. Bohužel není možné se v této bakalářské práci termínu „kalibrační vztah“ vyhnout, neboť norma [1] jej výhradně používá. Vždy, když bude tato norma citována, bude termín „kalibrační vztah“ použit. Správně se však vždy jedná o „regresní závislost“.

Kalibrační vztah vyjadřuje závislost mezi ukazateli nedestruktivního měření, popřípadě z nich vypočtených hodnot sledované vlastnosti a ukazatel vlastnosti betonu, zjištěnými obvykle destruktivně na potřebném počtu zkušebních vzorků.

Stanoví se metodami matematické statistiky a jeho rozsah musí být takový, aby umožňoval stanovení hodnot sledované vlastnosti všech velikostí, které mohou při zkoušení přicházet v úvahu [1].

- **Obecný kalibrační vztah** – pokud není stanoven výrobcem zkušebního přístroje, odvodí se z vyhodnocených zkoušek, provedených nejméně na 300 zkušebních vzorcích z betonů různého složení a s použitím různé technologie tak, aby hodnoty sledované vlastnosti byly stejnoměrně rozložené v pravidelných intervalech v celém oboru sledovaných vlastností [1].
- **Směrný kalibrační vztah** – odvodí se z vyhodnocených zkoušek, provedených nejméně na 100 zkušebních vzorcích, které byly vyrobeny z volených druhů betonu různého složení, jenž přicházejí v úvahu pro sledovanou vlastnost a volené technologie tak, aby hodnoty sledované vlastnosti byly stejnoměrně rozložené v pravidelných intervalech v celém oboru sledovaných vlastností [1].
- **Úzký určující kalibrační vztah** – kalibrační vztah se pro beton dané třídy odvodí z vyhodnocených zkoušek, provedených na takovém počtu zkušebních vzorků,

které umožňují stanovení tří nebo čtyř sdružených bodů, stejnoměrně rozložených v oboru měřené vlastnosti. Pro každý sdružený bod tohoto kalibračního vztahu je třeba vyzkoušet nejméně šest zkušebních vzorků, pokud předpis pro zkušební metodu nestanovuje jinak. Je to určující kalibrační vztah, stanovený v rozsahu jedné třídy betonu [1].

- **Široký určující kalibrační vztah** – kalibrační vztah se pro beton daného rozsahu tříd odvodí z vyhodnocených zkoušek, které umožňují stanovení pěti až šesti sdružených bodů, stejnoměrně rozložených v oboru měřené vlastnosti. Je to určující kalibrační vztah, stanovený v rozsahu dvou nebo více tříd betonu [1].

2.2 Tvrdoměrné metody a jejich rozdělení

Dle způsobu vyvození síly dělíme tvrdoměrné metody na:

- **statické** - užívané v laboratořích;
- **dynamické** – užívané na konstrukcích.

Pro zjišťování tvrdosti materiálů používáme tyto metody:

2.2.1 Vrypová metoda

Je to porovnávací metoda určování tvrdosti vrypem jednoho materiálu do druhého.

Této metodě náleží stupnice tvrdosti dle Mohse:

1. mastek, 2. sůl kamenná (sádrovec), 3. vápenec, 4. kazivec, 5. apatit, 6. živec,
7. křemen, 8. topas, 9. korund, 10. diamant [3]

2.2.2 Vtiskové metody

Nejčastěji určují velikost vtisku ve zkoušeném materiálu zatlačením vnikajícího tělíska určenou silou. Nejběžnější vtiskové metody jsou:

- tvrdost dle Brinella (HB);
- tvrdost dle Janky (HJ);
- tvrdost dle Vickerse (HV);
- tvrdost dle Rockwella (HR);
- tvrdost měřená pružinovým tvrdoměrem dle Baumanna;
- tvrdost kladívkem Poldi;

- tvrdost dle Waitzmanna [3].

2.2.3 Vnikací metody

Vnikací metody jsou založeny na vniknutí tvrdého tělesa do měkčího materiálu, např.: malty, betonu opakovanými rázy. Měří se buď hloubka vniku špičáku zaraženého předepsaným počtem úderů, nebo naopak počet úderů potřebný na vnik špičáku do požadované hloubky. Požívané vnikací metody jsou:

- špičáková metoda Ing. J. Maška;
- špičáková metoda Prof. Cigánka;
- špičáková metoda Baumannovým kladívkem;
- elektromagnetický špičák [3].

2.2.4 Odrazové metody

Odrazové metody jsou založeny na pružném podrazu tělesa, padajícího z určené výšky nebo vrženého jistou energií od povrchu zkoušeného materiálu.

- měření tvrdosti kovů dle Shora;
- měření tvrdosti betonů, malt a cihel Schmidtovými sklerometry [3].

2.3 Postupy pro získávání pevnosti betonu v tlaku

Zkušební postup musí odpovídat normovým ustanovením, platným pro zvolenou nedestruktivní metodu zkoušení betonu [1].

Pevnost betonu v tlaku se zkouší:

- Tvrdoměrnými metodami** (dle 2.2) – ČSN 73 1373, ČSN EN 13791
- Ultrazvukovou impulzovou metodou**
- Ultrazvukovou impulzovou metodou a Schmidtovým tvrdoměrem N** [2]

Norma ČSN 73 1373 neuvádí přímo kalibrační vztahy mezi hodnotou odrazu tvrdoměru a krychelnou pevností betonu v tlaku. Hodnoty odrazu pro různé tvrdoměry jsou uvedeny v tabulkách. Pro Schmidův tvrdoměr byly tabulkové hodnoty zpracovány s využitím statistiky do kalibračních vztahů.

Norma ČSN EN 13791 popisuje postup stanovení charakteristické pevnosti betonu v tlaku v konstrukci a z tohoto důvodu je nezbytné provádět upřesnění výsledků

nedestruktivních zkoušek po kalibraci se zkouškami vývrtů. Norma se odkazuje na zkušební zařízení, postupy a vyjádření výsledků uvedené v ČSN EN 12504-1 a ČSN EN 12504-2. Uvádí jako jeden z možných postupů upřesnění výsledků zkoušek pevnosti betonu v tlaku, s využitím základní křivky vyjadřující vztah mezi pevností betonu v tlaku a parametrem ze zkoušky tvrdosti odrazovým tvrdoměrem s využitím tzv. posunu základní křivky [15].

2.4 Přístroje pro měření tvrdosti betonů

Tvrdoměrná kladívka Schmidt slouží k nedestruktivnímu zkoušení kvality betonu na hotových stavbách a zkušebních vzorcích. Od té doby, co firma PROCEQ SA vyvinula tuto metodu měření tvrdosti, stala se rychle nejrozšířenější na celém světě, v ČR se používá již od šedesátých let.

Vzhledem ke skutečně masovému používání této metody pro základní stanovení kvality betonu je třeba klást stále vyšší požadavky na odbornost pracovníků, kteří s těmito přístroji měří a provádějí vyhodnocování naměřených hodnot [5].

2.4.1 Odrazový tvrdoměr OriginalSchmidt

Základní přístroj pro nedestruktivní měření pevnostních charakteristik. Přístroj je celý mechanický a je k dispozici v modelech s různými velikostmi nárazové energie. Přístroj zasáhne beton definovanou energií, hodnota odrazu je závislá na tvrdosti betonu a naměří se přístrojem.

Přístroje se dělí na **OriginalSchmidt N/L/M, NR/LR**. Tvrdoměry s označením R mají jednotku, která zaznamenává hodnoty odrazu na papírový proužek, který má kapacitu až 4000 zkušebních dopadů [6].

- **OriginalSchmidt N** - nárazová energie 2,207 Nm
 - pro testovací objekt min. tl. 100 mm při pevném uchycení
- **OriginalSchmidt L** - nárazová energie 0,735 Nm
 - pro křehké materiály a konstrukce do tl. 100 mm
- **OriginalSchmidt M** – nárazová energie 29,43 Nm



Obr. 2.1 Tvrdoměr OriginalSchmidt s mechanickou stupnicí hodnoty odrazu [16].



Obr. 2.2 Tvrdoměr OriginalSchmidt s jednotkou na zaznamenání hodnoty odrazu [17].

2.4.2 Odrazový tvrdoměr SilverSchmidt

Nejnovější odrazový tvrdoměr, který umožňuje měření v různých směrech bez úhlové korelace. Detekuje koeficient odrazu na základě rychlostí před a po odrazu v blízkosti dopadu razníku. Tvrdoměr je určen pro široký rozsah tlakových pevností v rozmezí 10 až 100 MPa a nabízí automatický převod do požadovaných měrných jednotek (MPa, N/mm², kg/cm², psi).

Přístroj má operační jednotku se záznamem výsledků testu s možností vyhodnocení po nahrání do počítače přes jednotku USB pomocí softwaru **Schmidt Hammer**. Dle typu nárazové energie se přístroje dělí na **SilverSchmidt ST/PC N** a **SilverSchmidt ST/PC L** [7].



Obr. 2.3 Tvrdoměr SilverSchmidt s integrovaným displejem [7].

2.4.3 Odrazový tvrdoměr DigiSchmidt

Klasický OriginalSchmidt vybaven senzorem, který měří hodnotu odrazu a ukazuje naměřené hodnoty na displeji přiložené zobrazovací jednotky. Přístroj nabízí přenos naměřených dat do počítače nebo tisk.

Dle typu nárazové energie se dělí na typy **ND**, **LD** [8].



Obr. 2.4 Tvrdoměr DigiSchmidt se zobrazovací jednotkou [8].

2.4.4 Tvrdoměr Schmidt OS - 120

Přístroj s půlkruhovou stupnicí a systémem zpětného odrazu kyvadla. Jsou navrženy pro zkoušení měkkých materiálů, například lehkého nebo čerstvého betonu, matly spár do zdiva. Jeho konstrukce umožňuje snadnou manipulaci a měření ve svislých a vodorovných plochách.

Dělí se na Schmidt **OS-120 PT** s větším povrchem pístu a **OS-120 PM** se speciálně vyvinutým pístem pro aplikaci na povrch maltové spáry [9].



Obr. 2.5 Tvrdoměr Schmidt OS – 120 PT s větším povrchem pístu [9].

2.5 Vývoj tvrdoměrných metod pro zkoušení betonu a nejnovější přístroje

Za posledních 25 let došlo k překotnému vývoji stavebních materiálů a technologií, což vedlo k nutnosti inovovat stávající zkušební normy, metody i přístrojové vybavení. Díky určité prodlevě ve vývoji metod došlo dokonce k jejich odsunutí za zkoušky destruktivní. Teprve v posledních několika letech dochází spolu s modernizací přístrojového vybavení i k širšímu využití nedestruktivních metod.

Oblíbenost tvrdoměrných přístrojů spočívala v poměrně jednoduchém postupu, podle něhož bylo možné na základě zjištěného ukazatele tvrdosti stanovit hodnotu krychelné pevnosti betonu v tlaku. Vzhledem k naprostému nedostatku kvalitního zařízení pro odběr jádrových vývrtů byly nedestruktivní metody preferovány i v normách i přes nižší přesnost oproti normovým destruktivním zkouškám. Po upřesnění pevností betonu v tlaku získaných tvrdoměrným měřením nebo při použití kalibračních vztahů bylo na výsledky zkoušek nahlíženo stejně, jako by byly získány na zkušebních krychlích.

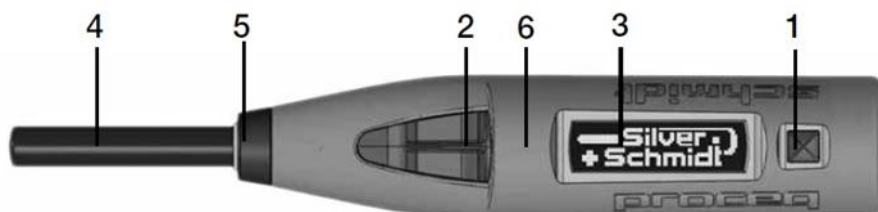
V novém vydání ČSN 73 1373 nejsou uvedeny dva typy tvrdoměrných přístrojů, ovšem ani špičkový tvrdoměr a odrazový tvrdoměr Schmidt M se dnes v praxi nepoužívá. V současnosti se tvrdoměrné měření provádí výhradně odrazovými tvrdoměry Schmidt typu N nebo L. Kromě toho byla metoda obohacena o nová elektronická kladívka SilverSchmidt. Toto kladívko měří pomocí optických čidel rychlost úderu a zpětného rázu

okamžitě před úderem a po něm, přičemž vypočítá množství energie, k jejímuž obnovení může dojít. Znamená to, že hodnota „Q“, představující koeficient odrazu je oproti hodnotě odrazu „ α “ méně závislá na vodící tyči, gravitaci a relativní rychlosti mezi kladívkem a vzorkem.

Jednou z novinek je přístroj SilverSchmidt L s hříbovým nástavcem (Mushroom Plunger), s jehož pomocí je možné zkoušet při odbedňování betonu s pevností v tlaku již od 5 MPa. K přístroji výrobce dodává směrnou kalibrační křivku, ovšem přesnější bude vždy vlastní kalibrační vztah, vytvořený pro beton konkrétního druhu a složení [13].




2.5.1 Popis přístroje SilverSchmidt

Přístroj má modré pogumované tělo, bránící přístupu nečistot a prachu do vnitřních částí přístroje. Přístroj je zakončen razníkem, u typu L je možno použít hříbový nástavec. Ve střední části přístroje se nachází LCD displej, udávající výsledky a zobrazující nastavení. Mezi razníkem a displejem se nachází USB konektor pro spojení s PC. V blízkosti displeje se také nachází výběrové tlačítko pro ovládání přístroje.



Obr. 2.6 Tvrdoměr SilverSchmidt, 1 – Tlačítko VYBRAT, 2 – USB port, 3 – LCD displej, 4 – Razník, 5 – Vodící pouzdro, 6 – Tělo přístroje [18].

2.5.2 Přehled použití přístrojů s ohledem na rozsah pevnosti betonu v tlaku

Concrete Compressive Strength Range											
1 - 5 MPa 145 - 725 psi		5 - 10 MPa 725 - 1,450 psi		10 - 30 MPa 1,450 - 4,351 psi		30 - 70 MPa 4,351 - 10,153 psi		70 - 100 MPa 10,153 - 14,504 psi		> 100 MPa > 14,504 psi	
Fresh Concrete Very Low Strength Concrete				Normal Concrete				High Strength Concrete		Ultra High Performance Concrete	
<div>SilverSchmidt</div> <div></div>				SilverSchmidt ST/PC Type N						Only with user defined custom curves	
				SilverSchmidt ST/PC Type L							
		SilverSchmidt PC Type L with Mushroom Plunger									
		Only with user defined custom curves									
<div>Original Schmidt</div> <div></div>				Original Schmidt Type N/ND/NR							
				Original Schmidt Type L/LD/LR							
<div>Schmidt OS-120</div> <div></div>		Schmidt OS-120PT		Only with user defined custom curves							

Type N	Standard impact energy. Minimum thickness of test object: 100 mm (3.9") and should be firmly fixed in the structure.
Type L	Low impact energy. Suitable for brittle objects or structures less than 100 mm (3.9") thick.

Obr. 2.7 Použití přístrojů s ohledem na rozsah pevnosti betonu. [19].

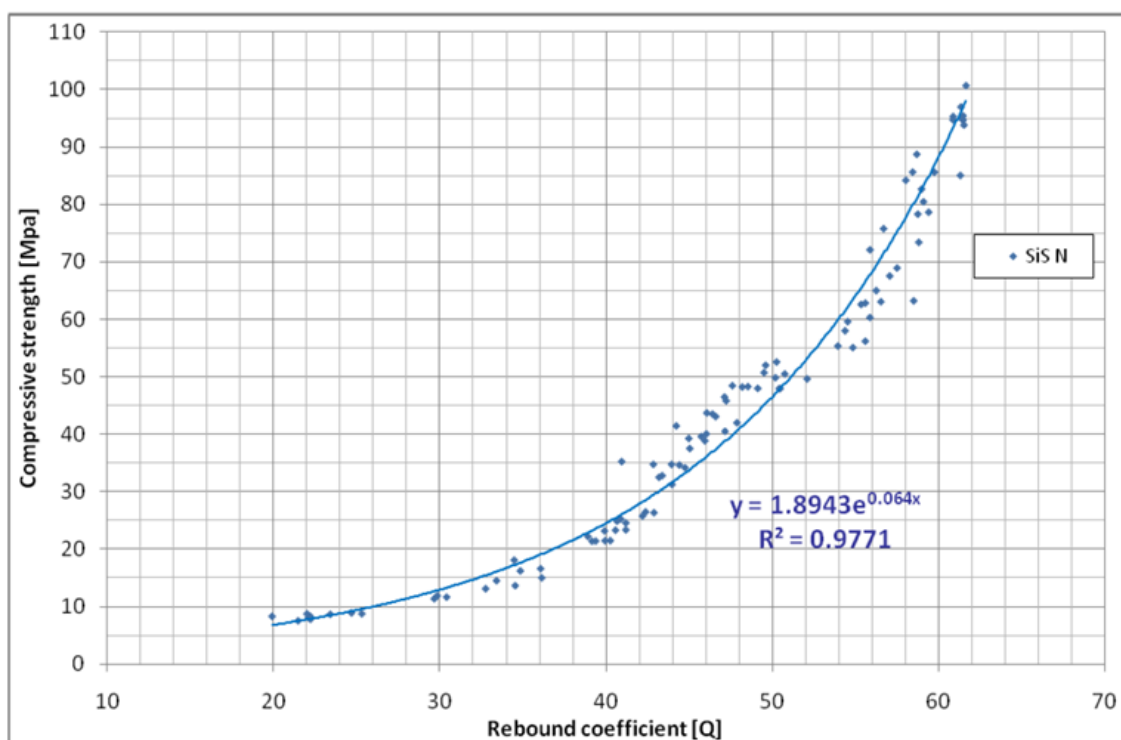
2.5.3 Kalibrační křivky pro přístroje SilverSchmidt

Ze zkušebních těles s rozměry 150 x 150 x 150 mm byly odvozené vzorové kalibrační vztahy pro přístroje SilverSchmidt. Pro přístroj SilverSchmidt typ N byly vytvořeny dvě kalibrační křivky. Pro přístroj SilverSchmidt typ L a typ L s hříbovým pístem byla vytvořena jedna kalibrační křivka. Křivky vytvořil BAM (Federální institut pro výzkum materiálů a testování v Berlíně, Německo) během rozsáhlých testů.

Pro přístroj SilverSchmidt typ N byla vytvořena 50% kalibrační křivka o rovnici (2.1) s rozsahem odrazového koeficientu $Q = 20 - 62$ a pevností betonu v tlaku $f = 10 - 100$ MPa, viz Obr. 2.8.

$$y = 1,8943e^{0,064x}, \quad (2.1)$$

kde y vyjadřuje pevnost betonu v tlaku v MPa, e je Eulerovo číslo, x je hodnota koeficientu odrazu Q a R^2 je součinitel determinace [20].

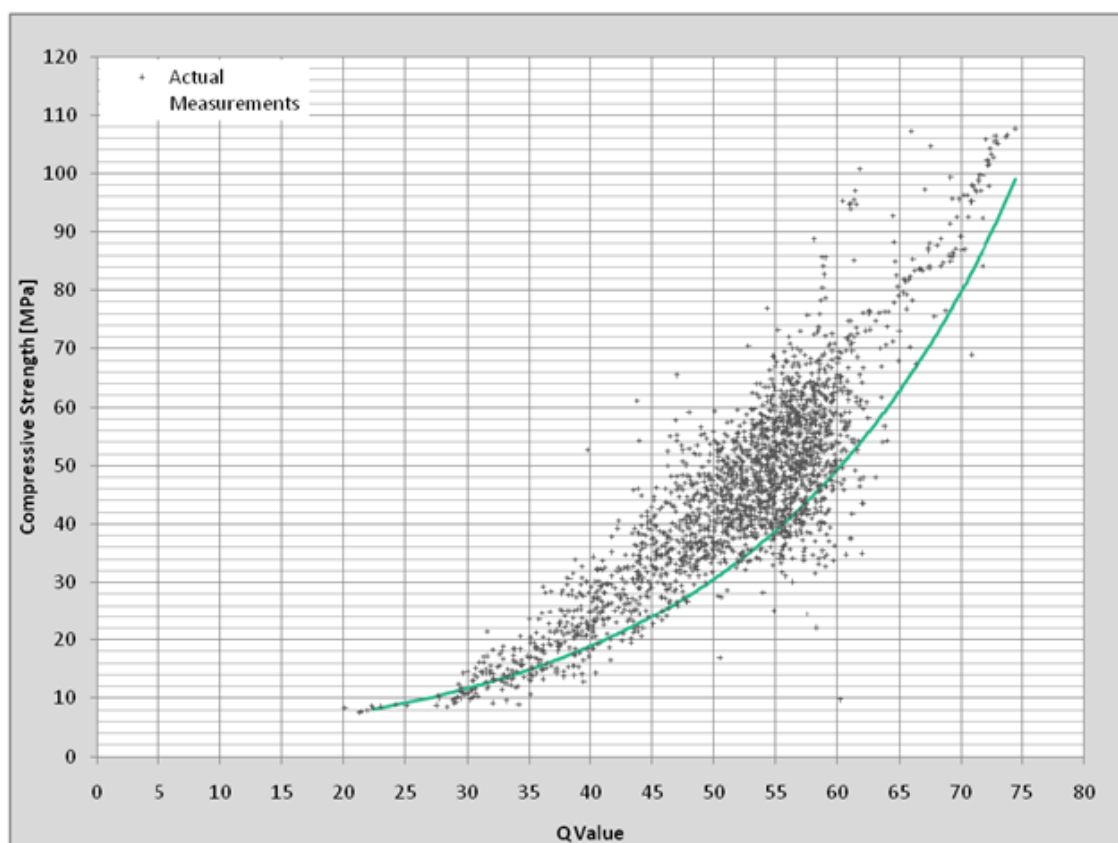


Obr. 2.8 Referenční kalibrační křivka SilverSchmidt typ N s odrazovým koeficientem Q na ose x a pevnosti betonu v tlaku na ose y [20].

Pro požadavky normy EN 13791 byla vytvořena 10% kalibrační křivka o rovnici (2.2), to znamená, že 10% hodnot leží pod křivkou a 90% hodnot leží nad křivkou. Kalibrační křivka byla vytvořena pro rozsah odrazového koeficientu $Q = 22 - 75$ a pevnost betonu v tlaku 8 – 100 MPa, viz Obr. 2.9.

$$f_{ck} = 2,77e^{0,048Q}, \quad (2.2)$$

kde f_{ck} vyjadřuje pevnost betonu v tlaku v MPa, e je Eulerovo číslo a Q je hodnota koeficientu odrazu [20].

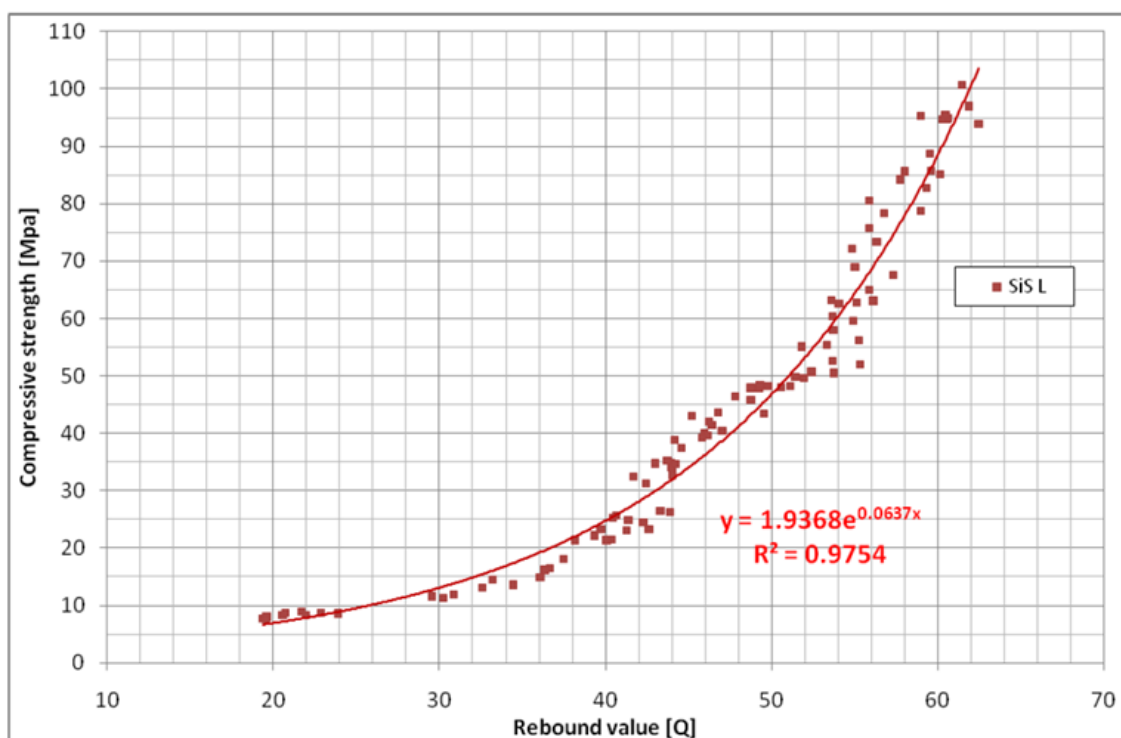


Obr. 2.9 10% referenční kalibrační křivka SilverSchmidt typ N s odrazovým koeficientem Q na ose x a pevnosti betonu v tlaku na ose y [20].

Pro přístroj SilverSchmidt typ L byla vytvořena 50% kalibrační křivka o rovnici (2.3) s rozsahem odrazového koeficientu $Q = 20 - 62$ a pevností betonu $10 - 100$ MPa, viz Obr. 2.10.

$$y = 1,9368e^{0,0637x}, \quad (2.3)$$

kde y vyjadřuje pevnost betonu v tlaku v MPa, e je Eulerovo číslo, x je hodnota koeficientu odrazu Q a R^2 je součinitel determinace [20].

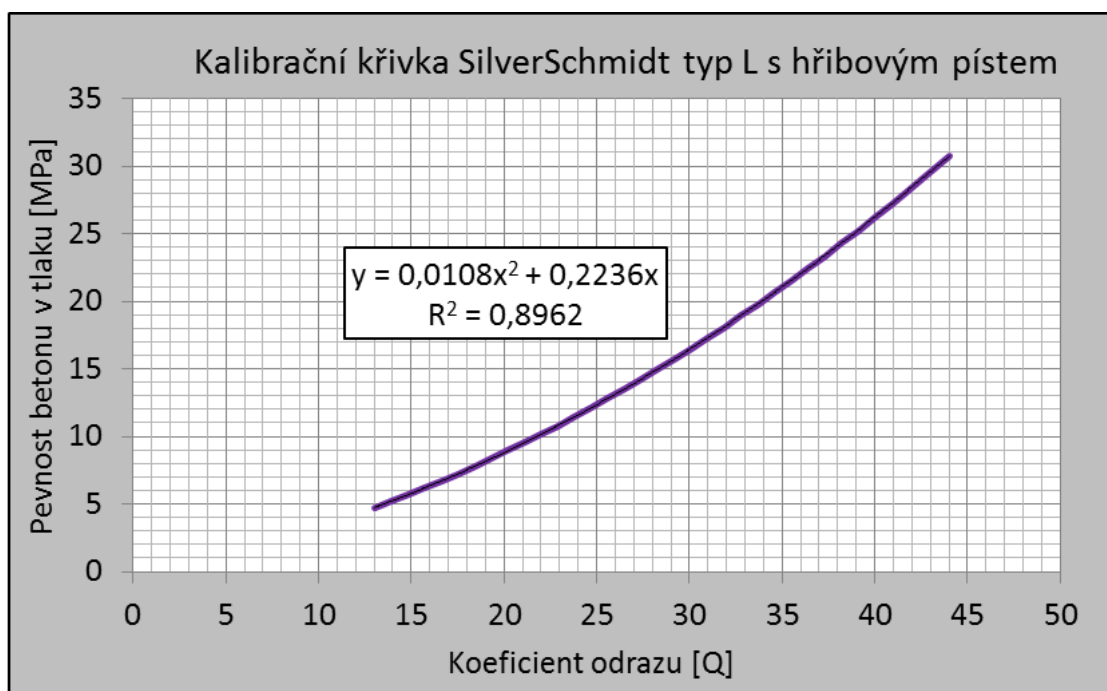


Obr. 2.10 Referenční kalibrační křivka SilverSchmidt typ L s odrazovým koeficientem Q na ose x a pevnosti betonu v tlaku na ose y [20].

Pro přístroj SilverSchmidt typ L s hříbovým nástavcem byla z naměřených dat v institutech BAM a EMPA (Švýcarské federální laboratoře pro materiálové testování a výzkum) vytvořena 50% kalibrační křivka o rovnici (2.4) s rozsahem odrazového koeficientu $Q = 13 - 44$ a pevností betonu $5 - 30$ MPa, viz Obr. 2.11.

$$y = 0,0108x^2 + 0,2236x, \quad (2.4)$$

kde y vyjadřuje pevnost betonu v tlaku v MPa, x je hodnota koeficientu odrazu Q a R^2 je součinitel determinace [21].



Obr. 2.11 Referenční kalibrační křivka SilverSchmidt typ L s hříbovým pístem. Odrazový koeficient Q na ose x a pevnost betonu v tlaku na ose y [18].

3 METODIKY ZKOUŠENÍ PODLE RŮZNÝCH PŘEDPISŮ

Pro tvrdoměrné zkoušení betonových konstrukcí a dílců lze v ČR použít dva normativní přístupy:

- **ČSN**
 - ČSN 73 1370 Nedestruktivní zkoušení betonu – společná ustanovení
 - ČSN 73 2011 Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí
 - ČSN 73 1373 Nedestruktivní zkoušení betonu – Tvrdoměrné metody zkoušení betonu
- **ČSN EN**
 - ČSN EN 12504-1 Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 1: Vývrty – Odběr, vyšetření a zkoušení v tlaku
 - ČSN EN 12504-2 Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 2: Nedestruktivní zkoušení – Stanovení tvrdosti odrazovým tvrdoměrem
 - ČSN EN 13791 Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích a v prefabrikovaných betonových dílcích
 - ČSN EN 12390-3 OPRAVA 1 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles

3.1 Řada norem ČSN EN

3.1.1 Podstata zkoušky

Beran je vymrštěn pružinou na ocelový razník, který je ve styku s povrchem konstrukce nebo zkoušeného tělesa. Výsledek zkoušky se vyjádří číslem velikosti odrazu. Toto číslo se může také získat z vynaložené energie nebo z různých rychlostí před a po nárazu berana [10].

3.1.2 Zkušební zařízení

- **Odrazový tvrdoměr** (rebound hammer) – skládá se z ocelového berana s pružinou, která po uvolnění vymrští beran na ocelový razník proti povrchu betonu. Velikost odrazu se zjišťuje na stupnici, která je připojena k zařízení.
- **Kalibrační kovadlina** (calibration anvil) – ocelová kovadlina pro ověřování tvrdoměru. Její minimální tvrdost je 52 HRC, hmotnost (16 ± 1) kg a průměr přibližně 150 mm. Mohou se použít jiné kovadliny, pokud se prokáže stejná přesnost.
- **Brusný kámen** (abrasive stone) – středně zrnitý karborundový kámen nebo jiný ekvivalentní materiál [10].

3.1.3 Zkušební plocha

Betonové prvky, které mají být zkoušeny, musí mít tloušťku nejméně 100 mm a musí být spojeny s konstrukcí. Menší tělesa mohou být zkoušena za předpokladu, že jsou pevně podepřena. Povrch zkoušeného tělesa by neměl být vysoce porézní s hrubou texturou a je nutno se vyhnout místům se šterkovými hnízdy a s odlupováním.

Rozměry zkušební plochy by měly být přibližně 300 x 300 mm. Brusným kamenem se obrousí hrubé nebo měkké povrchy tak, aby byly hladké bez uvolněného materiálu.

Musí se odstranit jakákoli voda na povrchu betonu [10].

3.1.4 Zkušební postup

- **Předběžná příprava** – před sérií zkoušek se očistí plocha na kalibrační kovadlině a razník. Proveďte se nejméně pět úderů na referenční kovadlině a zaznamená se čtení příštích pěti úderů. Pokud je odchylka čtení větší než ± 3 od hodnoty uvedené výrobcem, razník se vyčistí a nastaví podle pokynů výrobce a zkoušení se opakuje. Tvrdoměr je nutno používat při teplotách v rozsahu od 0°C do 50°C.
- **Zkoušení** – tvrdoměr se přiloží na zkušební plochu tak, aby se razník opřel kolmo na zkoušený povrch. Razník se plynule stlačuje, dokud ocelový beran nevyvede ráz. Po každém úderu se zaznamená velikost odrazu. Vyšetří se vtisk po úderu razníku, a pokud je povrch porušen nebo poškozen, čtení se vyloučí. Na každé zkušební ploše se provede nejméně 9 platných měření. Zaznamená se poloha a směr

působení tvrdoměru pro každou sadu čtení. Minimální vzdálenost zkušebních bodů je 25 mm od sebe a 25 mm od hrany konstrukce.

- **Referenční kontrola** – po provedení zkoušky se tvrdoměr ověří na kalibrační kovadlině a zaznamená se pět čtení. Pokud je odchylka čtení větší než ± 3 od hodnoty uvedené výrobcem, razník se vyčistí a nastaví podle pokynů výrobce a je nutné zkoušku opakovat [10].

3.1.5 Výsledek zkoušky

Výsledkem zkoušky je střední hodnota ze všech čtení a při jejich úpravě se bere v úvahu směr působení tvrdoměru a vyjádří se jako celé číslo. Pokud se více než 20% všech čtení liší od střední hodnoty více než 30%, musí být zamítnuta celá sada měření [10].

3.1.6 Vyhodnocení zkoušky

Nepřímé metody jsou v podstatě metody polodestruktivní nebo nedestruktivní a mohou se použít po kalibraci se zkouškami vývrtů v následujících případech:

- samostatně;
- v kombinaci s nepřímými metodami;
- v kombinaci s nepřímými metodami a přímou metodou (vývrty).

Jsou uvedeny dvě alternativní metody pro posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukci [11].

3.1.7 Alternativa 1 – Přímá korelace s vývrty

Tato alternativa se používá pro nepřímé zkoušení při posuzování pevnosti betonu v tlaku, kdy je stanoven konkrétní vztah mezi pevností betonu a výsledky zkoušek vývrtů. Ke stanovení vztahu je nutno nejméně 18 dvojic výsledků zkoušek nepřímou metodou a 18 výsledků zkoušek vývrtů. Nejlepší křivka nebo přímka se stanoví z regresních analýz údajů dvojic ze zkoušení. Vypočte se standardní chyba odhadu a stanoví se meze pro nejvhodnější čáru nebo křivku a pro jednotlivá měření. Vztah, který se používá pro odhad pevnosti, udává takovou úroveň, kde 90% hodnot pevností se předpokládá vyšších než odhadnutá hodnota, tzn. 90% procentní kvantil. Při posuzování pevnosti platí podmínky:

- posouzení každé zkušební oblasti nejméně na 15 zkušebních místech;

- směrodatná odchylka musí být vypočtená z výsledků zkoušek nebo hodnota $3,0 \text{ N/mm}^2$, podle toho která hodnota je větší.

Charakteristická pevnost betonu v tlaku v konstrukci ve zkušební oblasti je nižší hodnota z následujících dvou vztahů [11]:

$$f_{ck,is} = f_{m(n)} - 1,48 \times s \quad (3.1)$$

$$f_{ck,is} = f_{is,nejmenší} + 4, \quad (3.2)$$

kde $f_{ck,is}$ je charakteristická pevnost betonu v tlaku v konstrukci, $f_{m(n)}$ je aritmetický průměr z n výsledků zkoušek pevnosti betonu v tlaku v konstrukci, $f_{is,nejmenší}$ je nejnižší výsledek zkoušky betonu v tlaku v konstrukci a s je směrodatná odchylka výsledků zkoušek [11].

3.1.8 Alternativa 2 – Kalibrace s vývrtý pro vymezený rozsah pevnosti betonu v tlaku použitím stanoveného vztahu

Tento postup je založen na použití základní křivky a jejího posunu k příslušné úrovni zjištěné ze zkoušek jádrových vývrtů. Vybere se zkušební oblast, která obsahuje nejméně 9 zkušebních míst. V každém místě se provede měření podle EN 12504 – 2 a zkoušení jádrových vývrtů dle EN 12504 – 1. Poté sestavíme graf příslušné pevnosti v tlaku vývrtů proti výsledkům nepřímých zkoušek. Pro každé zkušební místo stanovíme rozdíl mezi zjištěnou hodnotou na vývrtu a hodnotou uvedenou na základní křivce.

$$\delta f = f_{is} - f_R, \quad (3.3)$$

Vypočte se střední hodnota $\delta f_{m(n)}$ pro n počet výsledků a směrodatná odchylka s . Posun základní křivky se spočítá ze vztahu

$$\Delta f = \delta f_{m(n)} - k_I \times s, \quad (3.4)$$

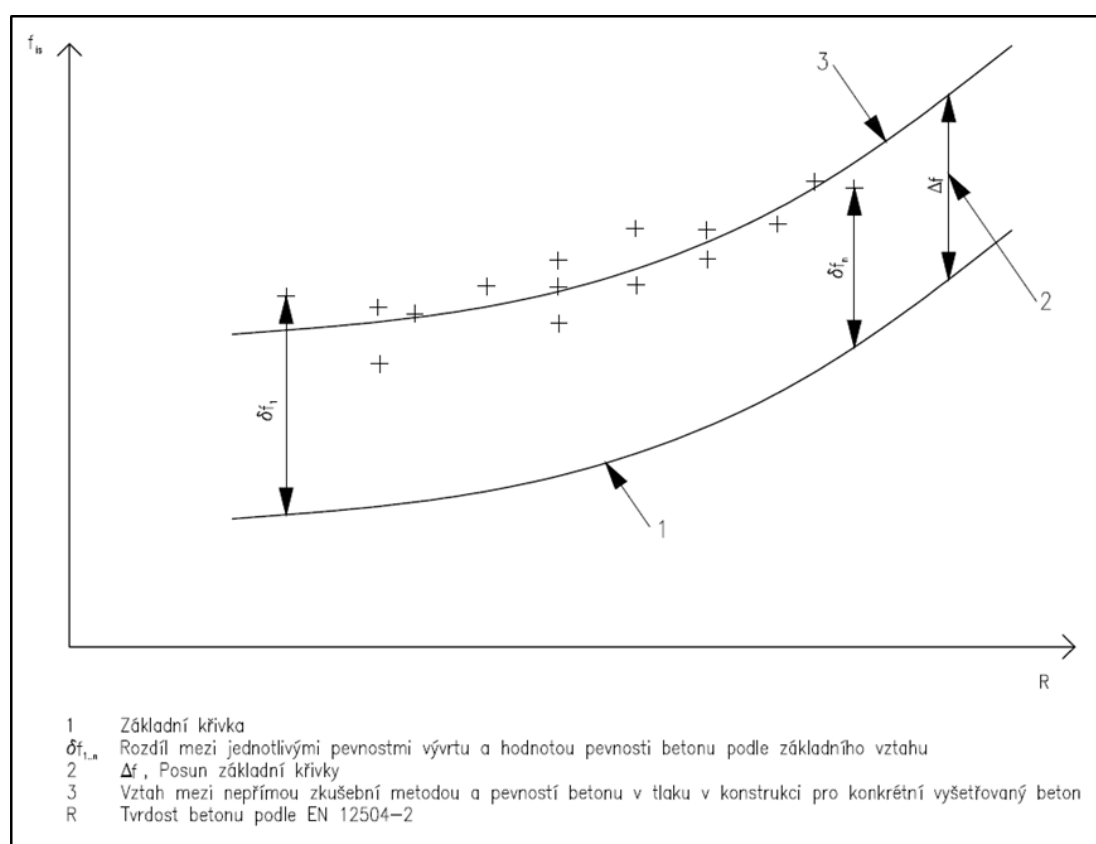
kde k_I se získá z tabulky Součinitele k_I (Tab. 2.1). Základní křivka se posune o hodnotu Δf , aby se získal vztah mezi nepřímou zkouškou a pevností betonu v tlaku

v konstrukci pro vyšetřovaný beton f_{is} . Stanovený vztah platí v rozsahu ± 2 hodnoty tvrdosti mimo rozsah, který byl použit k získání posunu.

Pro posouzení charakteristické pevnosti betonu v tlaku v konstrukci se použijí postupy uvedené u Alternativy 1, dle rovnice (3.1) a (3.2). Posouzení, založené na zkušebních vývrtech za použití základních křivek dle ČSN EN 13791 bere jako ekvivalentní pevnost betonu v tlaku v konstrukci jako pevnost krychelnou $f_{ck,is,cube}$. Po výpočtu se beton zařadí do pevnostních tříd dle tabulky 1 uvedené v ČSN EN 206 – 1 [11].

Tab. 3.1 Součinitel k_1 závislý na počtu zkušebních dvojic [5].

Počet výsledků zkušebních dvojic n	Součinitel k_1
9	1,67
10	1,62
11	1,58
12	1,55
13	1,52
14	1,50
≥ 15	1,48



Obr. 3.1 Zásada pro zjištění vztahu mezi pevností betonu v tlaku v konstrukci a údaji z nepřímé zkušební metody [11].

3.2 Řada norem ČSN

V porovnání s ČSN 73 1373 z roku 1981 došlo v roce 2011 ke sjednocení a úpravě normy s ohledem na vydání ČSN EN. Tyto normy mohou být používány současně. Ustanovení této normy, která jsou shodná s ČSN EN 12504-2, byly do této normy převzaty nebo nahrazeny.

V normě jsou uvedeny metody Schmidtových tvrdoměrů a metoda špičákového tvrdoměru. [12].

3.2.1 Podstata zkoušky

Při zkoušce v tlaku Schmidtovým tvrdoměrem se zjišťuje velikost odrazu beranu přístroje od zkoušeného povrchu, ze které se stanoví pevnost v tlaku. Metoda špičákového tvrdoměru stanovuje pevnost betonu v závislosti na počtu rázů, potřebných k tomu, aby byla kuželová špice zkušebního zařízení zaražena do předepsaných hloubek [12].

3.2.2 Zkušební zařízení

- **odrazový tvrdoměr** (rebound hammer) – viz 2.1.2;
- **kalibrační kovadlina** (calibration anvil) – viz 2.1.2;
- **brusný kámen** (abrasive stone) – viz 2.1.2;
- **špičákový tvrdoměr** – pružinový nebo elektromagnetický tvrdoměr s definovanou energií úderu a kuželová špice dle obrázku B.1 normy ČSN 73 1373 [10;12].

3.2.3 Zkušební místa

Beton se zkouší na vybraných a upravených zkušebních místech a volí se tak, aby reprezentovala zkoušenou plochu betonu. Zkušební místa musí velikostí odpovídat požadavkům předepsaným pro použitou tvrdoměrnou metodu. Každé zkušební místo se pro zkoušku upraví předepsaným způsobem, včetně odstranění povrchové vrstvy betonu, je-li zkarbonatována nebo pokud by ovlivnění bedněním zkreslovalo výsledek zkoušky.

Pro Schmidtvův tvrdoměr typu N, L a špičákový tvrdoměr je velikost zkušebního místa minimálně $0,02 \text{ m}^2$ a pro typ M je minimální velikost zkušebního místa $0,04 \text{ m}^2$.

Vzdálenost od hran zkušebního tělesa je nejméně 30 mm pro Schmidtův tvrdoměr typu N, L a nejméně 60 mm pro Schmidtův tvrdoměr typu M a špičákový tvrdoměr [12].

3.2.4 Zkušební postup

- **Předběžná příprava** – viz 2.1.4 [10].
- **Zkoušení** – razník tvrdoměru se přiloží kolmo na zkoušený povrch betonu a stlačuje pomalým plynulým pohybem až ocelový beran vyvodí ráz. Velikost odrazu beranu se odečte na ukazateli tvrdoměru a zaznamená. U přístrojů s registračním zařízením se velikost automaticky zaznamená na záznamovou fólii. Na každém zkušebním místě se provede nejméně 7 platných měření.

Při měření špičákovým tvrdoměrem se na cementovou maltu zkušebního místa kolmo přiloží špice tvrdoměru. Opakovanými údery se špice zarážá do betonu a zjišťuje počet úderů potřebných k tomu, aby špice vnikla pod povrch betonu do hloubky 5 mm, 10 mm, popřípadě 15 mm. Do hloubky 15 mm se špice zarážá tehdy, když k dosažení této hloubky stačí nejvýše 30 úderů. Na jednom zkušebním místě se provedou nejméně 3 platná měření. Projde-li při některém z nich špice dutinou v betonu, nebo narazí na větší zrno kameniva, zkouška se přeruší a toto měření vyloučí [12].

- **Referenční kontrola** – viz 2.1.4 [10].

3.2.5 Výsledek zkoušky

- **Metoda Schmidtových tvrdoměrů** - ke každé hodnotě měření se odečte hodnota pevnosti podle obecného nebo směrného kalibračního vztahu. Hodnota pevností platných měření se nesmí lišit od aritmetického průměru všech měření o více jak 20%. Pevnosti, které vybočují z těchto odchylek se vyloučí a ze zbývajících sedmi platných měření se vypočte nový aritmetický průměr.
- **Metoda špičákového tvrdoměru** – z každého platného vpichu do betonu se stanoví pevnost v tlaku z obecného kalibračního vztahu. Vypočte se aritmetický průměr a hodnoty jednotlivých měření se od něho nesmí lišit o více než 20%. Pevnosti, které vybočují z těchto odchylek se vyloučí a ze zbývajících nejméně tří hodnot se vypočte nový aritmetický průměr [12].

3.2.6 Vyhodnocení zkoušky

Podle způsobu stanovení hodnot vlastností zkoušeného betonu při jeho nedestruktivním zkoušení se rozlišují:

- upřesněné zkoušky;
- zkoušky s nezaručenou přesností.

Hodnoty vlastností betonu s nezaručenou přesností se stanoví z obecného nebo směrného kalibračního vztahu. Upřesněné hodnoty vlastností betonu se stanoví buď upřesněním obecného nebo směrného kalibračního vztahu součinitelem α nebo z určujícího kalibračního vztahu [1].

3.2.7 Pevnost betonu v tlaku s nezaručenou přesností

Pevnost betonu v tlaku s nezaručenou přesností stanovíme z obecného, popř. směrného kalibračního vztahu (viz. ČSN 73 1370), přičemž se přihlíží k poloze tvrdoměru při zkoušce. Pro jiné odklony tvrdoměru je nutno použít kalibrační křivky pro stanovení pevnosti betonu v tlaku s nezaručenou přesností z obecného kalibračního vztahu f_{be} podle směru zkoušení, popřípadě provést interpolaci podle přímky hodnot nejbližších poloh tvrdoměru. Jestliže zkoušený beton konstrukce nebo dílce je starší než 56 dnů a pro kalibrační vztahy nebyly odebrané vzorky z konstrukce, vynásobí se součinitelem α_t . Je-li zkoušený beton jiný než vlhký, popř. přirozeně vlhký, vynásobí se součinitelem α_w [12].

Tab. 3.2 Součinitel α_t [12].

Stáří betonu	Součinitel α_t
57 - 180 dnů	0,95
181 - 360 dnů	0,93
nad 360 dnů	0,90

Tab. 3.3 Součinitel α_w [12].

Vlhkost betonu	Součinitel α_w
beton suchý	0,85
beton přirozeně vlhký a vlhký	1,00
beton nasycený vodou	1,05

Obecný kalibrační vztah je vyjádřen tabulkově, graficky, ale i matematicky dle rovnic pro Schmidtův tvrdoměr typu N.

- Směr vodorovný:
 - Přímka A $f_{be} = 1,750 \alpha - 29,000$ (3.5)
 - Přímka B $f_{be} = 1,786 \alpha - 30,440$ (3.6)
- Směr svisle dolů:
 - Přímka A $f_{be} = 1,562 \alpha - 17,813$ (3.7)
 - Přímka B $f_{be} = 1,667 \alpha - 21,667$ (3.8)
- Směr svisle nahoru:
 - Přímka A $f_{be} = 1,857 \alpha - 40,708$ (3.9)
 - Přímka B $f_{be} = 1,923 \alpha - 43,611$ (3.10)

Přímka A je pro odrazy v rozmezí 25 – 40, přímka B je pro odrazy v rozmezí 41 – 54, α je velikost odrazu [12].

3.2.8 Pevnost betonu v tlaku upřesněná

Uprěsněná pevnost betonu v tlaku má stejnou váhu jako pevnost zjištěná pomocí destruktivní zkoušky a lze ji vyhodnotit dvěma metodami:

- **pomocí určujícího kalibračního vztahu**
 - úzkého nebo širokého (viz. ČSN 731370)
- **pomocí obecného nebo směrného kalibračního vztahu**
 - upřesněním pomocí součinitele α

Nejdříve se z obecného nebo směrného kalibračního vztahu určí pevnost betonu s nezaručenou přesností f_{be} a upřesněním α pomocí rovnice (3.11) se zjistí pevnost betonu v tlaku f_b . [12].

$$f_b = \alpha * f_{be} \quad (3.11)$$

Pro upřesnění obecného nebo směrného kalibračního vztahu součinitelem α je zapotřebí:

Nejméně 9 krychlí nebo válců podle ČSN 73 1370, zhotovených ze stejných složek jako beton vyšetřované konstrukce nebo dílce, ošetřovaných a zhutňovaných stejným způsobem a stejným stářím. Hrana krychle 150 mm, válec průměru a výšky 150 mm.

Tělesa vyjmutá ze zkoumané konstrukce nebo dílce, počet těles závisí na jejich objemech. Minimálně 3 tělesa, pokud objem nepřesahuje 10 m³. Při objemu do 50 m³ nejméně 6 těles, a pokud je objem větší než 50 m³, je zapotřebí 9 těles. Pokud byly konstrukce nebo dílce nedestruktivně vyšetřovány v souladu s ČSN 73 1373 a vyhodnoceny pevnosti s nezaručenou přesností ze zkušebních míst, která vykazovala nejmenší, průměrnou a největší pevnost, jsou zapotřebí 3 tělesa [12].

Součinitel α se vypočte ze vztahu:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n f_{bi}}{\sum_{i=1}^n f_{bei}} \quad (3.12)$$

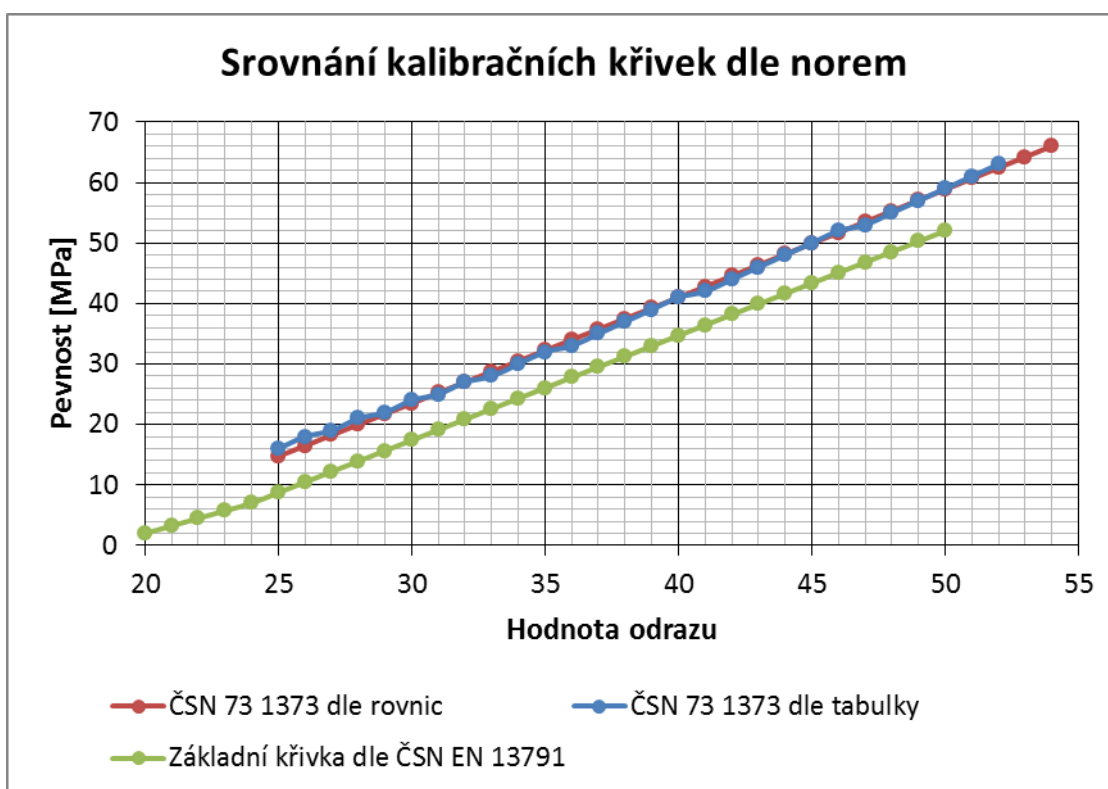
kde α je upřesňující součinitel, f_{bi} je pevnost v plaku stanovená na i -tém zkušebním vzorku dle ČSN EN 12390-2, f_{bei} je pevnost betonu v tlaku s nezaručenou přesností, stanovená na stejném zkušebním vzorku a n je počet zkušebních vzorků [12].

3.3 Porovnání normativních přístupů a kalibračních křivek dle norem

- ČSN EN
 - tvrdoměrné měření odrazovým tvrdoměrem
 - stejnoměrnost uložení betonu, odhad pevnosti betonu v tlaku v konstrukci
 - zamítnutí sady, pokud se více jak 20% hodnot liší o více 30% od aritmetického průměru všech měření
 - minimálně 9 platných měření na jednom zkušebním místě
 - Alternativa 1 – minimálně 18 dvojic vývrtů s nedestruktivní metodou
 - Alternativa 2 – minimálně 9 dvojic vývrtů s nedestruktivní metodou a posunem základní křivky

- ČSN
 - tvrdoměrné měření odrazovým a špičákovým tvrdoměrem
 - rovnoměrnost betonu, pevnost betonu v konstrukci v tlaku, v tahu
 - zamítnutí hodnoty, pokud se liší o více než 20% od aritmetického průměru všech měření
 - minimálně 7 platných měření na jednom zkušebním místě
 - Pevnost v tlaku s nezaručenou přesností – z obecného nebo směrného kalibračního vztahu
 - Pevnost betonu v tlaku upřesněná – z určujícího kalibračního vztahu a pomocí součinitele α

Pro grafické porovnání bylo vyhotoveno srovnání normových kalibračních křivek pro Schmidtův tvrdoměr typ N a vodorovný směr zkoušení.



Obr. 3.2 Srovnání kalibračních křivek dle norem [11;12].

4 TVRDOMĚRNÉ MĚŘENÍ NA BETONOVÝCH DÍLCÍCH

Praktická část bakalářské práce, která zahrnovala tvrdoměrné zkoušení betonových dílců a stanovení pevnosti v tlaku, byla provedena na 15 betonových kvádrech o rozměrech 300 x 300 x 150 mm, které byly zhotoveny z 5 receptur.

Tvrdoměrné zkoušky byly měřeny přístroji OriginalSchmidt typ N, SilverSchmidt typ N a SilverSchmidt typ L.



Obr. 4.1 Betonové kvádry a jádrové vývrty zkušební sady s označením 0/3.

Tab. 4.1 Receptury betonových směsí.

MATERIÁL (naváženo)		OZNAČENÍ BETONU				
		R	0/1	0/2	0/3	1/1
Cement CEM I 42,5 R (Mokrý)		248	308	357	392	295
Písek 0-4 mm (Bratčice)		953	925	889	826	927
Kamenivo 4-8 mm (Olbramovice)		173	182	174	195	185
Kamenivo 8-16 mm (Olbramovice)		675	696	693	669	689
Voda	záměsová	187	189	188	195	163
	v kamenivu	14	14	13	13	14
	celková	201	203	201	208	177
Sika ViscoCrete 4035 (plastifikátor)		0	0	0	0	0,71
Sika LPS A 94 (provzdušnění)		0	0	0	0	0

Vodní součinitel (skutečný):	0,75	0,61	0,53	0,50	0,55
------------------------------	------	------	------	------	------

Tab. 4.2 Vlastnosti betonových směsí.

BETON	VLASTNOSTI	OZNAČENÍ BETONU				
		R	0/1	0/2	0/3	1/1
Čerstvý	obj. hm. čerstvého betonu [kg/m³]	2 250	2 320	2 320	2 290	2 280
	rozlití [mm]	440	410	390	420	360
	sednutí [mm] (konzistence S2 - S3)	110	60	60	110	60
	obsah vzduchu [%]	2,8	2,7	2,5	2,5	3,6
Ztvrdlý	28denní krychelná pevnost v tlaku [MPa] EN 12390-3	21,3	33,4	44,8	57,0	43,3
		22,0	33,3	44,0	53,2	41,8
		21,5	33,1	44,8	57,1	43,2
		21,6	33,3	44,5	55,8	42,8
	28denní pevnost v tahu ohybem [MPa] EN 12390-5	3,4	3,6	5,8	5,8	3,9
		3,4	4,0	5,8	5,2	4,1
		3,3	4,1	5,8	5,5	3,6
		3,4	3,9	5,8	5,5	3,8

4.1 Postup

Všechna měření probíhala v souladu s platnými předpisy. Před měřením se přístroj aktivoval a provedl se odraz na referenční kovadlině. Po dokončení měření byla opět provedena kontrola. Hodnota odrazu byla v mezích udávaných výrobcem.

4.1.1 Příprava bloků

Každý blok jednotlivé receptury se zkoušel na dvou protilehlých stranách. Před zahájením měření se jednotlivé bloky označily a brusným kamenem jsme odstranili vrstvu cementového mléka z jeho povrchu.

4.1.2 Měření

Obě měřené strany byly rozděleny mřížkou, která byla ponechána z měření ultrazvukovým přístrojem a zajišťovala nám větší přehled provedených odrazů. Jednotlivé odrazy se prováděly min. 30 mm od sebe a 30 mm od okraje zkoušeného bloku. Naměřené hodnoty jednotlivých odrazů pro každý přístroj se zapisovaly do předem vytvořeného protokolu pro jednotlivé směsi a obě měřené strany. Pokud místo odrazu vykazovalo nějaké poškození, nebo se hodnota odrazu velmi výrazně odlišovala, hodnota byla

nahrazena. Měřilo se 5 hodnot pro každou stranu a přístroj. Z protokolu byl vytvořen kompletní výčet hodnot a zpracován do Tab. 4.3, Tab. 4.4 a Tab. 4.5.



Obr. 4.2 Tvrdoměrné měření přístroji OriginalSchmidt (obr. vlevo) a SilverSchmidt (obr. Vpravo). Na obrázcích je možno vidět mřížku od předchozího měření, která nám usnadnila orientaci v již proběhlých měřeních.



Obr. 4.3 Přístroj SilverSchmidt s digitálním ukazatelem koeficientu odrazu Q .

Tab. 4.3 Výčet hodnot pro přístroj OriginalSchmidt typ N.

Beton	Blok		Hodnota odrazu α				
R	R - 1	1	39,0	39,0	40,0	34,0	38,0
		2	39,0	39,0	41,0	42,0	40,0
	R - 2	1	34,0	38,0	38,0	39,0	38,0
		2	40,0	34,0	39,0	40,0	33,0
	R - 3	1	38,0	39,0	39,0	41,0	39,0
		2	34,0	37,0	32,0	40,0	37,0
0/1	0/1 - 1	1	42,0	42,0	40,0	43,0	41,0
		2	41,0	41,0	42,0	41,0	44,0
	0/1 - 2	1	41,0	41,0	42,0	41,0	40,0
		2	40,0	41,0	48,0	43,0	42,0
	0/1 - 3	1	40,0	39,0	40,0	41,0	42,0
		2	41,0	40,0	41,0	44,0	40,0
0/2	0/2 - 1	1	44,0	44,0	43,0	42,0	43,0
		2	45,0	44,0	44,0	50,0	49,0
	0/2 - 2	1	40,0	44,0	42,0	46,0	41,0
		2	42,0	43,0	43,0	46,0	44,0
	0/2 - 3	1	42,0	49,0	50,0	44,0	40,0
		2	42,0	42,0	49,0	42,0	46,0
0/3	0/3 - 1	1	44,0	49,0	48,0	51,0	50,0
		2	49,0	50,0	46,0	49,0	49,0
	0/3 - 2	1	48,0	47,0	50,0	44,0	46,0
		2	46,0	47,0	48,0	48,0	44,0
	0/3 - 3	1	51,0	48,0	50,0	47,0	49,0
		2	47,0	50,0	54,0	50,0	49,0
1/1	1/1 - 1	1	40,0	41,0	39,0	43,0	41,0
		2	41,0	47,0	40,0	39,0	40,0
	1/1 - 2	1	38,0	41,0	37,0	37,0	41,0
		2	40,0	39,0	40,0	41,0	41,0
	1/1 - 3	1	39,0	40,0	40,0	40,0	39,0
		2	38,0	43,0	40,0	40,0	43,0

Tab. 4.4 Výčet hodnot pro přístroj SilverSchmidt typ N.

Beton	Blok		Koeficient odrazu Q				
R	R - 1	1	50,5	49,5	50,0	52,5	48,5
		2	46,5	48,0	52,5	57,5	53,5
	R - 2	1	49,5	47,5	48,0	51,0	48,5
		2	52,5	49,0	47,0	46,5	48,5
	R - 3	1	49,0	54,0	47,5	51,0	53,0
		2	54,5	45,0	49,5	49,0	53,5
0/1	0/1 - 1	1	55,0	56,5	55,0	55,0	59,0
		2	55,5	56,0	57,0	55,5	55,0
	0/1 - 2	1	56,0	63,0	60,0	56,5	58,0
		2	54,5	53,0	53,5	55,5	61,0
	0/1 - 3	1	53,5	52,5	52,5	56,0	54,0
		2	51,5	55,5	53,5	55,0	49,5
0/2	0/2 - 1	1	58,5	60,0	63,5	62,5	62,0
		2	59,5	58,0	59,0	58,0	61,0
	0/2 - 2	1	56,5	51,5	58,5	55,0	62,5
		2	57,0	59,0	60,0	61,5	62,5
	0/2 - 3	1	63,0	61,0	60,0	57,0	58,0
		2	60,5	58,0	54,5	62,5	56,5
0/3	0/3 - 1	1	63,0	62,5	61,5	64,5	61,5
		2	63,5	61,5	63,0	61,5	63,5
	0/3 - 2	1	62,5	60,0	63,0	54,5	61,0
		2	61,0	59,0	62,0	54,5	59,0
	0/3 - 3	1	59,0	62,0	65,0	63,0	63,0
		2	64,0	62,0	63,0	61,0	60,0
1/1	1/1 - 1	1	53,5	53,0	56,0	56,0	55,0
		2	51,0	51,5	56,0	54,0	50,0
	1/1 - 2	1	56,0	51,0	50,5	49,5	50,5
		2	57,5	52,5	49,5	55,5	50,0
	1/1 - 3	1	53,0	48,0	52,0	56,0	56,0
		2	50,0	51,0	54,0	60,5	61,0

Tab. 4.5 Výčet hodnot pro přístroj SilverSchmidt typ L.

Beton	Blok		Koeficient odrazu Q				
R	R - 1	1	53,5	49,5	45,0	49,5	48,0
		2	47,0	48,0	48,5	47,5	49,5
	R - 2	1	47,0	47,0	49,0	44,0	45,0
		2	47,5	43,0	40,5	52,0	46,0
	R - 3	1	49,0	51,0	48,0	50,0	47,5
		2	42,0	42,5	46,0	46,5	59,0
0/1	0/1 - 1	1	51,0	52,0	55,0	54,5	53,5
		2	54,5	57,0	57,0	56,0	52,5
	0/1 - 2	1	55,0	54,5	58,5	48,0	54,5
		2	55,5	53,5	52,5	53,5	56,5
	0/1 - 3	1	53,0	53,5	52,0	53,5	52,5
		2	49,0	53,5	49,0	51,0	49,5
0/2	0/2 - 1	1	60,0	55,5	53,0	56,0	56,0
		2	55,5	56,5	59,0	59,0	54,5
	0/2 - 2	1	61,0	56,5	54,5	61,0	57,5
		2	56,5	59,5	57,5	59,0	56,0
	0/2 - 3	1	52,5	57,5	48,0	60,5	55,0
		2	60,5	62,0	55,0	57,0	57,0
0/3	0/3 - 1	1	63,0	58,0	60,5	63,0	62,0
		2	56,5	61,0	61,0	61,0	63,0
	0/3 - 2	1	58,5	60,5	59,0	56,0	58,0
		2	57,0	58,5	59,5	61,0	59,5
	0/3 - 3	1	57,5	63,5	56,5	63,5	62,0
		2	62,0	63,5	61,0	62,0	61,5
1/1	1/1 - 1	1	52,5	55,5	51,0	57,5	49,5
		2	54,5	54,5	51,0	49,5	48,0
	1/1 - 2	1	53,0	54,0	52,5	47,5	51,5
		2	52,5	51,0	51,5	50,5	55,0
	1/1 - 3	1	53,5	53,0	52,5	53,0	54,5
		2	54,0	50,5	51,0	53,5	53,5

4.1.3 Charakteristická pevnost betonu v tlaku na jádrových vývrtech

Jádrové vývrty z dílců jednotlivých receptur byly zkoušeny dle normy ČSN EN 12504-1. Pro toto vyhodnocení byly zhotoveny dva druhy vývrtů. Zkoušelo se na vývrtech jmenovitého průměru 100 x 100 mm a 75 x 75 mm. Jádrové vývrty se zarovnály kotoučovým řezáním a zatěžované plochy se zabrousily pomocí korundového prášku. Na vývrtech byl 4x změřen průměr d_n v mm a z nich následně spočítán průměr hodnot Φ_d , a

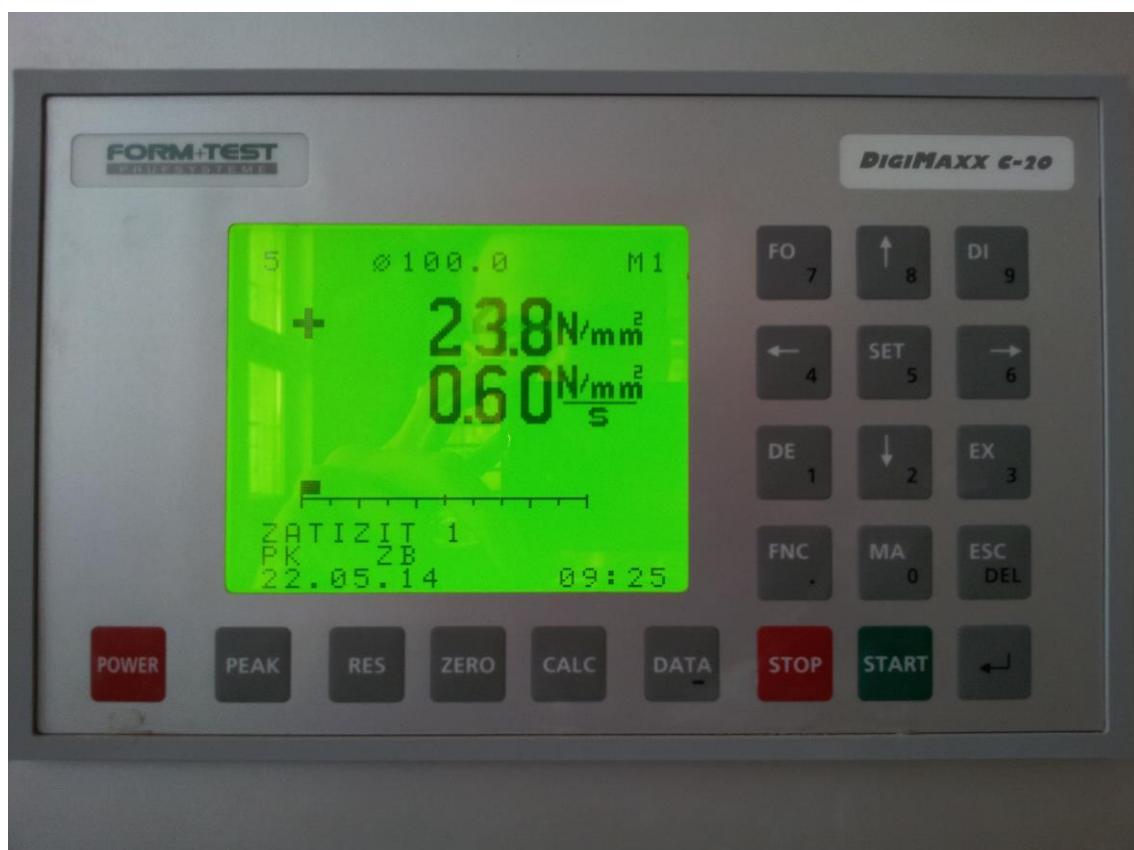
poté vypočtena plocha vývrtu A_d . Poté proběhla ve zkušebně zatěžovací zkouška v lisu, dokud nedošlo k porušení vývrtu. Výsledná síla F_{MAX} byla zapsána do protokolu a z těchto hodnot byla spočítána pevnost betonu v tlaku na jádrovém vývrtu $f_{is,vývrt}$ v MPa. Tyto hodnoty byly zpracovány do Tab. 4.6 a Tab. 4.7.

Tab. 4.6 Výpočet pevnosti v tlaku na jádrových vývrtech průměru 100 mm.

Beton	Blok	Těleso	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	Φ _d	A _d [mm]	F _{MAX} [kN]	f _{is,vývrt}
R	R - 1	A	99,56	99,54	99,75	99,55	99,60	7791,28	174,3	22,37
		B	100,06	99,71	99,52	99,76	99,76	7816,72	165,7	21,20
	R - 2	A	99,43	99,52	99,58	99,52	99,51	7777,59	188,3	24,21
		B	99,53	99,56	99,58	99,60	99,57	7786,19	162,9	20,92
	R - 3	A	99,50	99,59	99,54	99,52	99,54	7781,50	191,6	24,62
		B	99,53	99,48	99,60	99,55	99,54	7781,89	179,4	23,05
0/1	0/1 - 1	A	99,65	99,53	99,52	99,61	99,58	7787,76	238,0	30,56
		B	99,57	99,75	99,64	99,63	99,65	7798,71	255,1	32,71
	0/1 - 2	A	99,72	99,58	99,71	99,66	99,67	7801,84	262,1	33,59
		B	99,53	99,58	99,57	99,50	99,55	7782,67	247,9	31,85
	0/1 - 3	A	99,57	99,63	99,62	99,67	99,62	7794,80	240,6	30,87
		B	99,44	99,52	99,48	99,48	99,48	7772,51	244,5	31,46
0/2	0/2 - 1	A	99,55	99,61	99,74	99,65	99,64	7797,14	387,5	49,70
		B	99,65	99,74	99,57	99,71	99,67	7801,84	396,3	50,80
	0/2 - 2	A	99,80	99,65	99,71	99,82	99,75	7813,98	396,5	50,74
		B	99,59	99,55	99,70	99,67	99,63	7795,58	403,5	51,76
	0/2 - 3	A	99,70	99,72	99,77	99,64	99,71	7808,10	393,9	50,45
		B	99,76	99,67	99,68	99,72	99,71	7808,10	370,7	47,48
0/3	0/3 - 1	A	99,65	99,67	99,71	99,77	99,70	7806,93	428,0	54,82
		B	99,67	99,74	99,60	99,73	99,69	7804,58	421,3	53,98
	0/3 - 2	A	99,68	99,65	99,65	99,63	99,65	7799,49	419,0	53,72
		B	99,65	99,74	99,70	99,71	99,70	7806,93	386,5	49,51
	0/3 - 3	A	99,75	99,80	99,67	99,64	99,72	7809,28	392,1	50,21
		B	99,82	99,78	99,63	99,75	99,75	7813,98	410,0	52,47
1/1	1/1 - 1	A	99,99	100,78	100,82	100,74	100,58	7945,75	337,1	42,43
		B	100,69	100,73	100,82	100,77	100,75	7972,63	325,8	40,86
	1/1 - 2	A	100,04	99,57	99,62	99,60	99,71	7808,10	325,5	41,69
		B	99,60	99,56	99,59	99,52	99,57	7786,19	318,5	40,91
	1/1 - 3	A	100,72	100,80	100,79	100,75	100,77	7974,61	342,5	42,95
		B	100,81	100,77	100,76	100,71	100,76	7974,21	337,5	42,32

Tab. 4.7 Výpočet pevnosti v tlaku na jádrových vývrtech průměru 75 mm.

Beton	Blok	Těleso	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	Φ _d	A _d [mm]	F _{MAX} [kN]	f _{is,vývrt}
R	R - 1	A1	74,11	74,11	74,15	74,24	74,15	4318,59	91,2	21,12
		B1	74,12	74,04	73,94	74,08	74,05	4306,07	94,4	21,92
	R - 2	A1	74,07	74,11	74,23	74,12	74,13	4316,26	89,1	20,64
		B1	74,07	74,11	73,97	74,15	74,08	4309,56	96,6	22,42
	R - 3	A1	74,13	74,14	74,11	74,06	74,11	4313,64	100,6	23,32
		B1	74,11	74,14	74,04	73,93	74,06	4307,24	96,8	22,47
0/1	0/1 - 1	A1	74,14	74,08	74,26	74,05	74,13	4316,26	129,2	29,93
		B1	74,22	74,16	74,17	74,16	74,18	4321,50	123,0	28,46
	0/1 - 2	A1	74,20	74,14	74,20	74,11	74,16	4319,75	139,1	32,20
		B1	74,22	74,14	74,16	74,18	74,18	4321,21	127,5	29,51
	0/1 - 3	A1	74,14	74,09	74,13	74,15	74,13	4315,67	131,9	30,56
		B1	74,07	74,15	74,09	74,18	74,12	4315,09	144,6	33,51
0/2	0/2 - 1	A1	75,20	75,16	75,30	75,23	75,22	4444,12	223,8	50,36
		B1	75,16	75,18	75,19	75,15	75,17	4437,92	228,4	51,47
	0/2 - 2	A1	75,19	75,29	75,21	75,19	75,22	4443,82	228,6	51,44
		B1	75,19	75,12	75,15	75,18	75,16	4436,73	228,5	51,50
	0/2 - 3	A1	75,20	75,20	75,18	75,25	75,21	4442,34	218,3	49,14
		B1	75,20	75,25	75,28	75,20	75,23	4445,30	224,3	50,46
0/3	0/3 - 1	A1	75,14	75,33	75,12	75,20	75,20	4441,16	229,8	51,74
		B1	75,13	75,27	75,20	75,22	75,21	4442,05	232,4	52,32
	0/3 - 2	A1	75,21	75,27	75,25	75,18	75,23	4444,71	228,0	51,30
		B1	75,24	75,17	75,30	75,43	75,29	4451,50	225,8	50,72
	0/3 - 3	A1	75,17	75,20	75,22	75,20	75,20	4441,16	252,9	56,94
		B1	75,34	75,16	75,22	75,27	75,25	4447,07	251,4	56,53
1/1	1/1 - 1	A1	75,13	75,40	75,13	75,11	75,19	4440,57	178,1	40,11
		B1	75,12	75,01	75,14	75,09	75,09	4428,47	181,9	41,08
	1/1 - 2	A1	75,18	75,16	75,17	75,21	75,18	4439,10	175,5	39,54
		B1	75,10	75,13	75,14	75,25	75,16	4436,14	181,5	40,91
	1/1 - 3	A1	75,12	75,11	75,10	75,22	75,14	4434,08	169,6	38,25
		B1	75,11	75,10	75,14	75,10	75,11	4431,13	181,1	40,87



Obr. 4.4 Čtení a zápis hodnot z displeje zkušebního lisu.



Obr. 4.5 Zkoušení jádrového vývrtnu v lisu dle ČSN EN 12504-1 a zápis do protokolu.



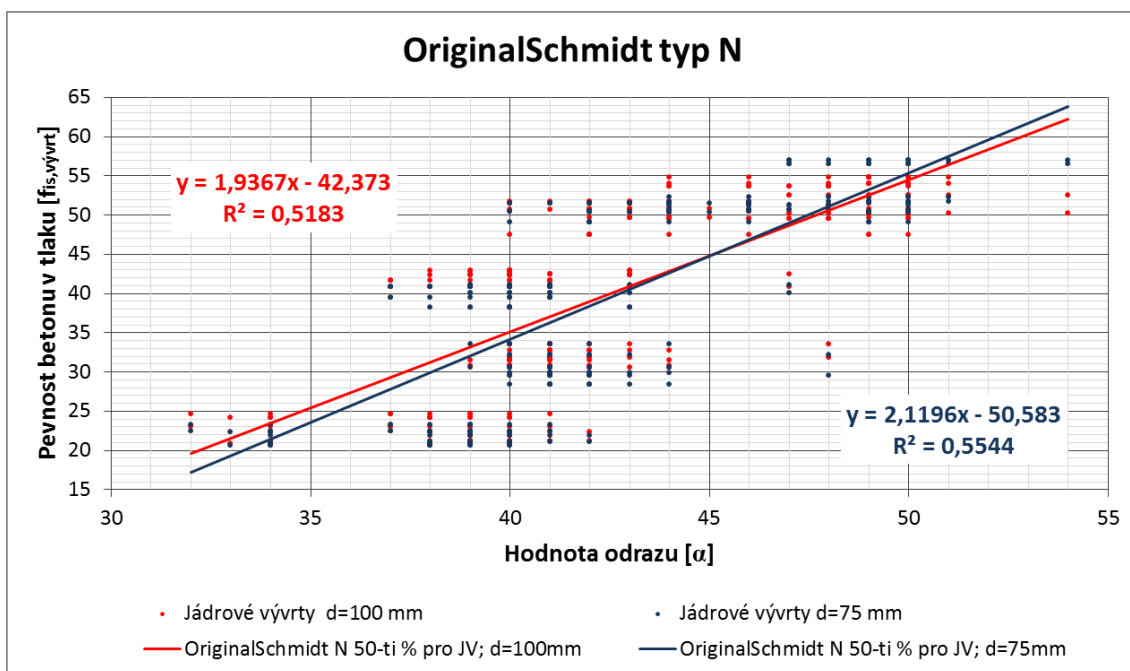
Obr. 4.6 Optimální porušení jádrového vývrtnu má tvar „presypacich hodin“.

4.2 Tvorba grafů regresní závislosti

Komplexní zpracování hodnot spočívalo ve vytvoření grafů regresní závislosti pro jednotlivé přístroje a receptury a jejich následné porovnání. Každé hodnotě odrazu α a koeficientu odrazu Q byla přiřazena pevnost betonu v tlaku, zjištěná na jádrových vývrtech. Zkoušely se dva zkušební válce u každé receptury. Byly zpracovány údaje pro zkušební válce jmenovitého průměru 100 mm a 75 mm. Dvojice výsledků tvrdoměrné metody a určujícího ukazatele pevnosti na jádrových vývrtech byly vyneseny do bodového grafu. Přidáním spojnice trendu byly získány rovnice jednotlivých grafů.

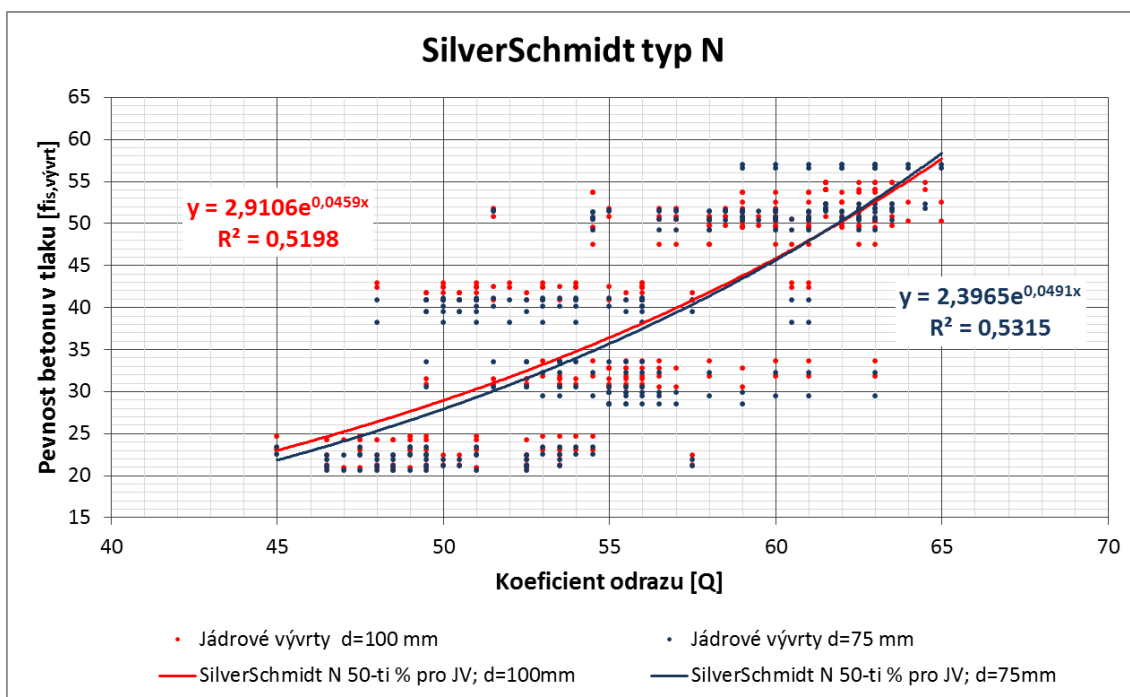
Vyjádření regresní závislosti je dáno rovnicemi, které jsou obsažené v jednotlivých grafech, kde y je pevnost betonu v tlaku v MPa, x vyjadřuje hodnotu odrazu α nebo koeficient odrazu Q , e je Eulerovo číslo a R^2 vyjadřuje součinitel determinace, který se dá vyjádřit také jako hodnota spolehlivosti.

4.2.1 Original Schmidt typ N



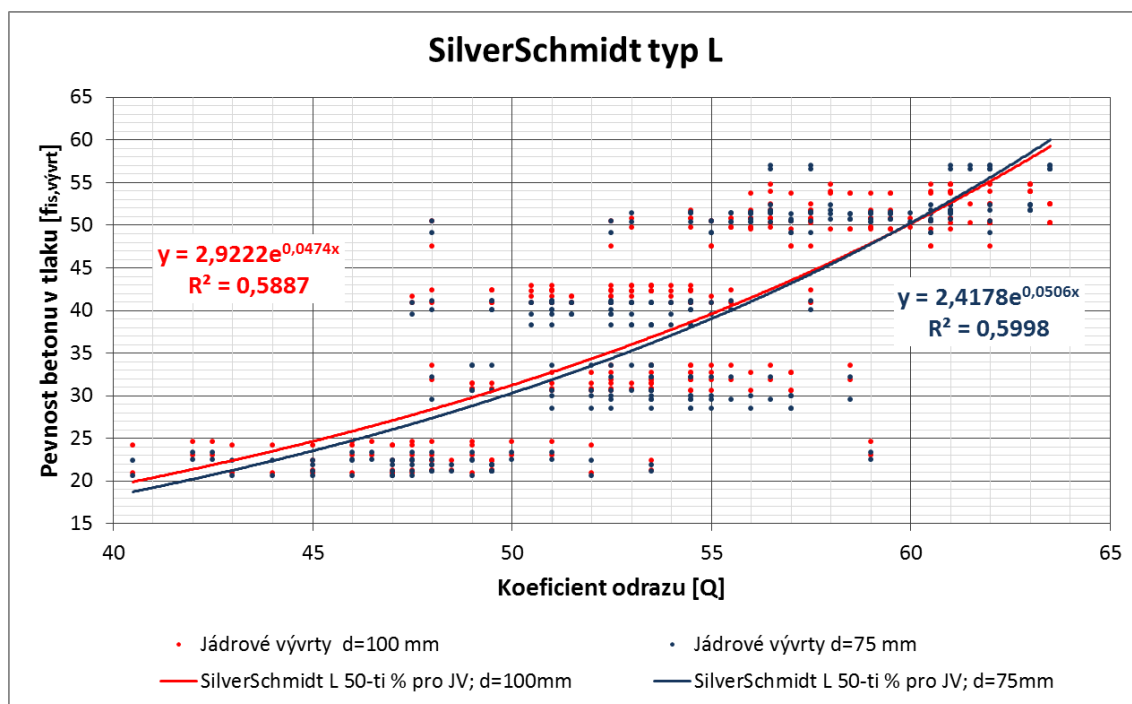
Obr. 4.7 Regresní závislost přístroje OriginalSchmidt typ N.

4.2.2 SilverSchmidt typ N



Obr. 4.8 Regresní závislost přístroje SilverSchmidt typ N.

4.2.3 SilverSchmidt typ L



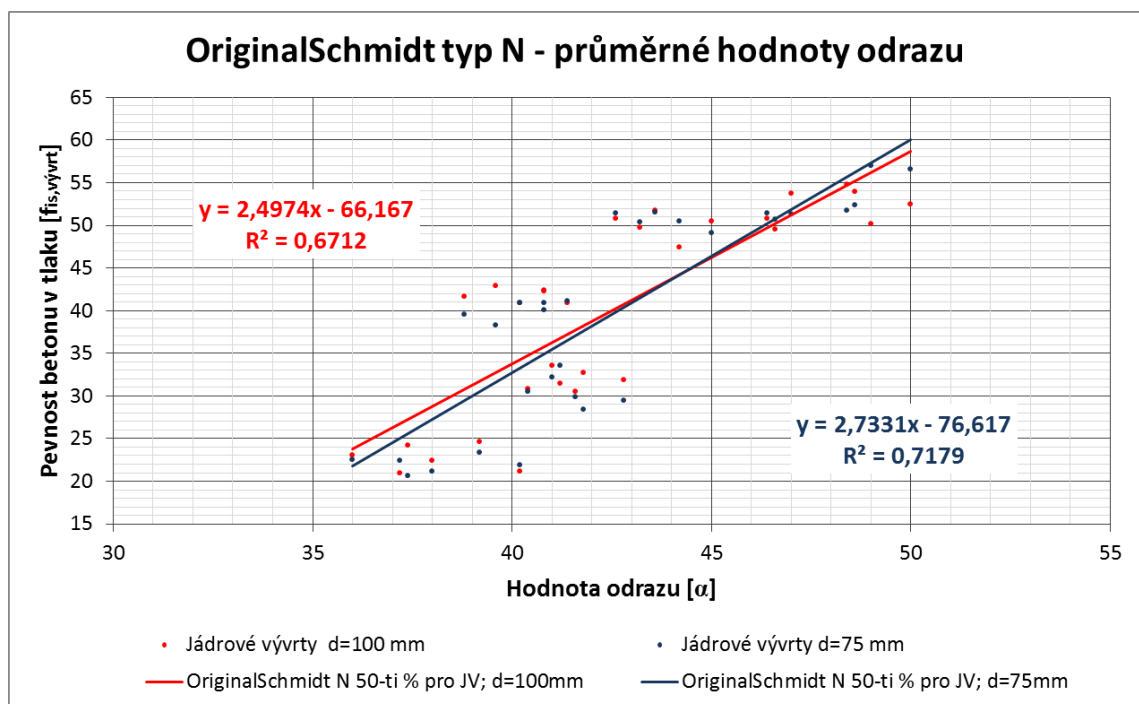
Obr. 4.9 Regresní závislost přístroje SilverSchmidt typ L.

4.3 Regresní závislost vytvořená z průměrných hodnot výsledků

Pro doplnění výsledků bylo provedeno zpracování a vytvoření grafů regresní závislosti z průměrných hodnot odrazu α a koeficientu odrazu Q pro jednotlivé přístroje a receptury. Průměrné hodnotě odrazu α a koeficientu odrazu Q byla přiřazena pevnost betonu v tlaku, zjištěná na jádrových vývrtech. Byly zpracovány údaje pro zkušební válce průměru 100 mm a 75 mm. Dvojice výsledků tvrdoměrné metody a určujícího ukazatele pevnosti na jádrových vývrtech byly vyneseny do bodového grafu. Přidáním spojnice trendu byly získány rovnice jednotlivých grafů.

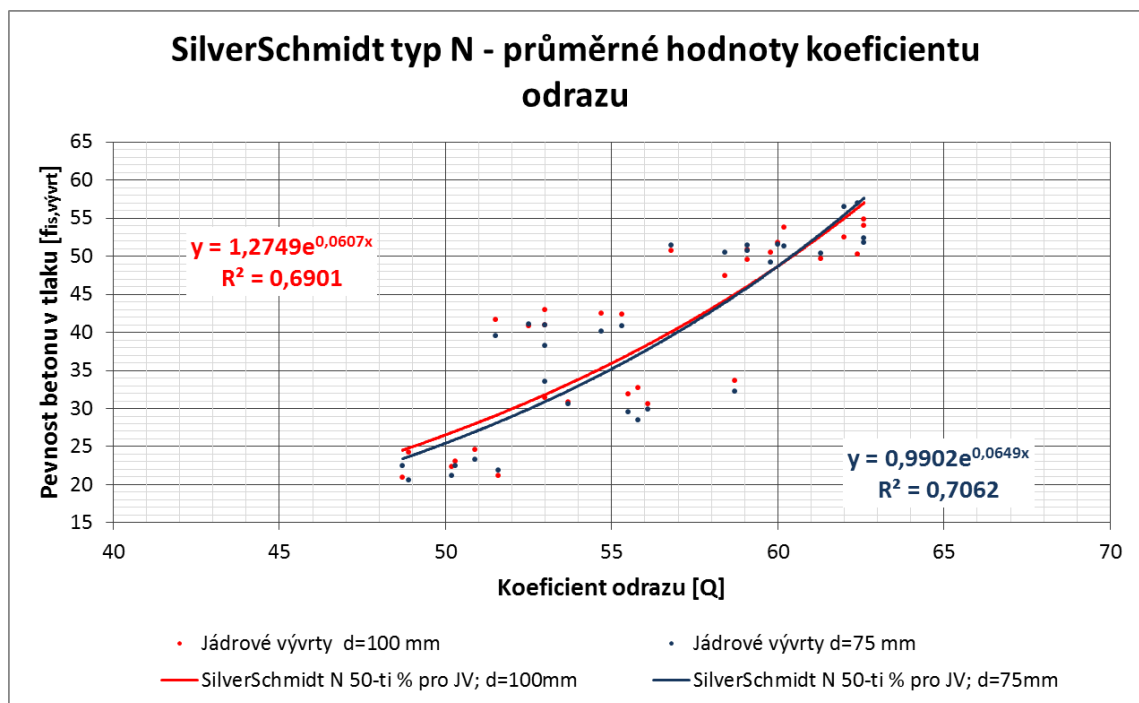
Vyjádření regresní závislosti je dáno rovnicemi, které jsou obsažené v jednotlivých grafech, kde y je pevnost betonu v tlaku v MPa, x vyjadřuje hodnotu odrazu α nebo koeficient odrazu Q, e je Eulerovo číslo a R^2 vyjadřuje součinitel determinace, který se dá vyjádřit také jako hodnota spolehlivosti.

4.3.1 OriginalSchmidt typ N



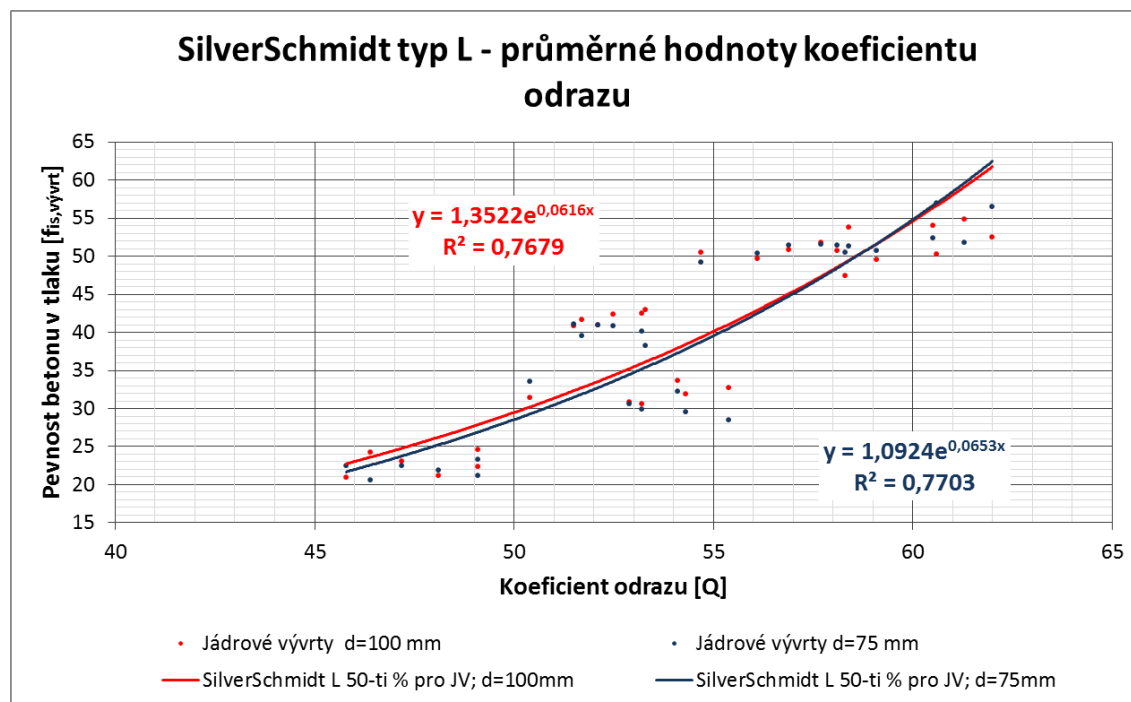
Obr. 4.10 Regresní závislost z průměrných hodnot přístroje OriginalSchmidt typ N.

4.3.2 SilverSchmidt typ N



Obr. 4.11 Regresní závislost z průměrných hodnot přístroje SilverSchmidt typ N.

4.3.3 SilverSchmidt typ L



Obr. 4.12 Regresní závislost z průměrných hodnot přístroje SilverSchmidt typ L.

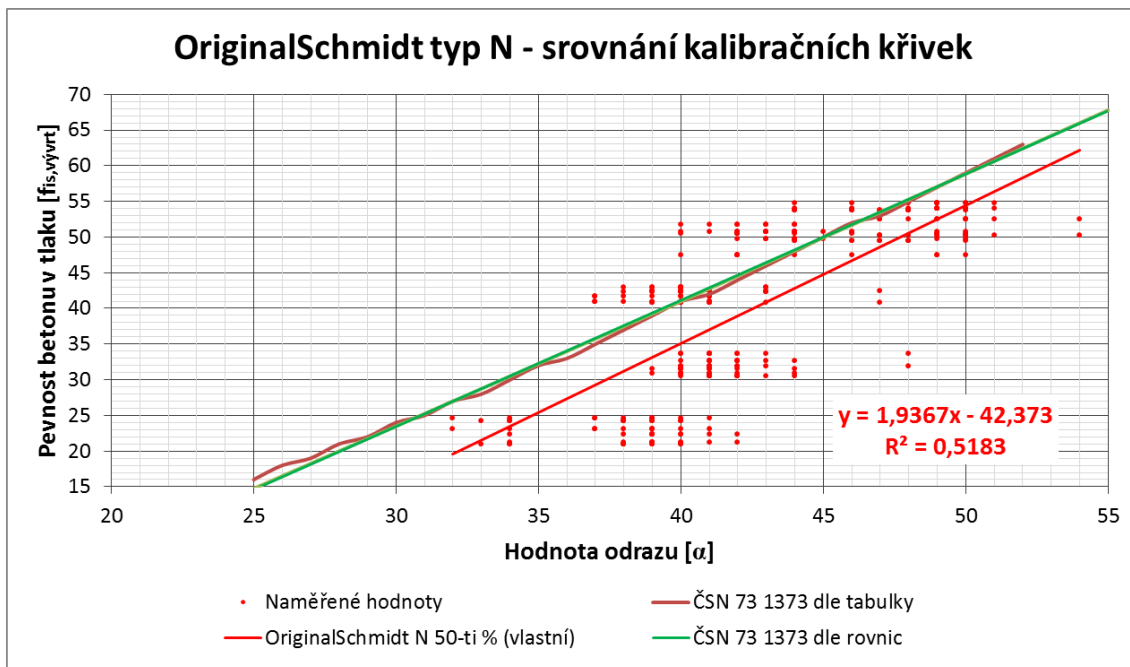
4.4 Vyhodnocení výsledků

Vyhodnocení spočívalo v porovnání grafů regresní závislosti s „kalibračními křivkami“. Přístroj OriginalSchmidt byl porovnán s křivkou normovou a přístroje SilverSchmidt byly porovnány s křivkami dodanými výrobcem. Pro porovnání byla u každého typu přístroje použita vlastní křivka regresní závislosti, která obsahuje hodnoty pevnosti betonu v tlaku na jádrových vývrtech o průměru a výšce 100 mm, které se dle normy ČSN EN 13791 klasifikují jako krychelná pevnost $f_{ck,cube}$.

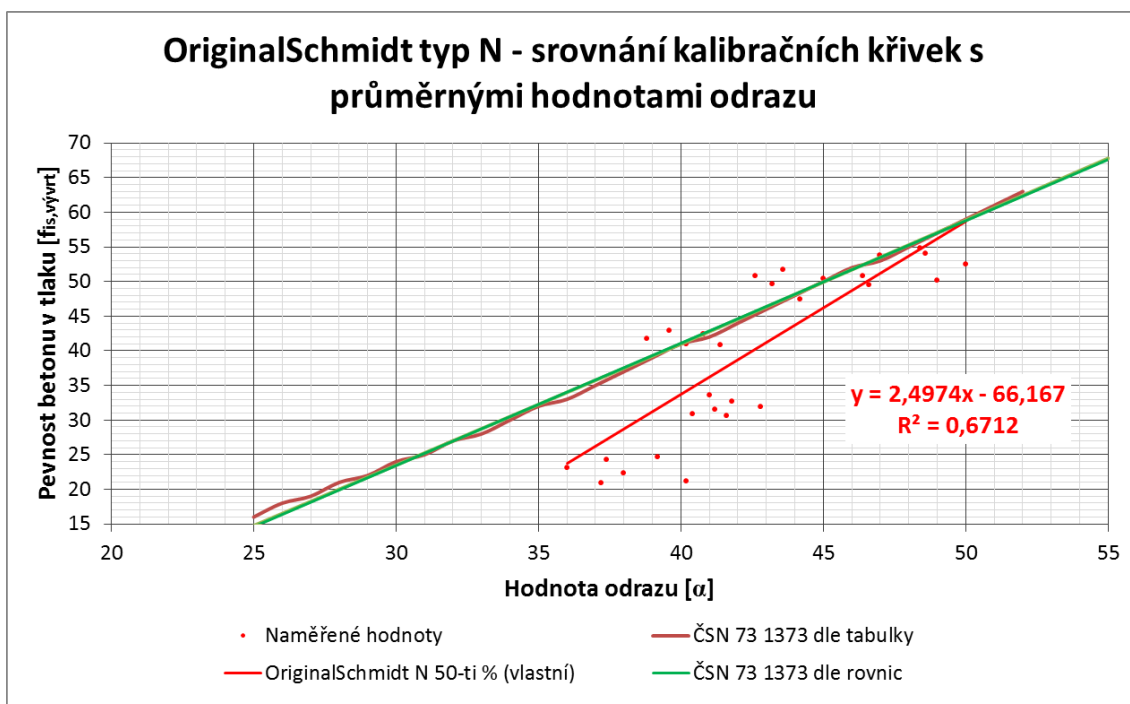
Byl porovnáván sklon přímek, jejich tvar a vzdálenost. Při porovnávání křivek regresní závislosti s regresními křivkami z průměrných hodnot vidíme rozdíl hodnot součinitele determinace (tzv. hodnoty spolehlivosti), který značně ovlivnil přístup k vyhodnocení. Při vyhodnocování výsledků byla pro zvýšení počtu hodnot pro vykreslení křivky regresní závislosti ze statistického hlediska přiřazena každé hodnotě odrazu α nebo koeficientu odrazu Q hodnota pevnosti betonu v tlaku, zjištěná na jádrových vývrtech. Tím byla snížena hodnota součinitele determinace. Oproti přístupu, kdy byla z hodnot odrazu α nebo koeficientů odrazu Q vypočtena průměrná hodnota, které byla následně přiřazena

hodnota pevnosti betonu v tlaku, zjištěná na jádrových vývrtech, je rozdíl v hodnotě součinitele determinace přibližně 30%.

4.4.1 Original Schmidt typ N

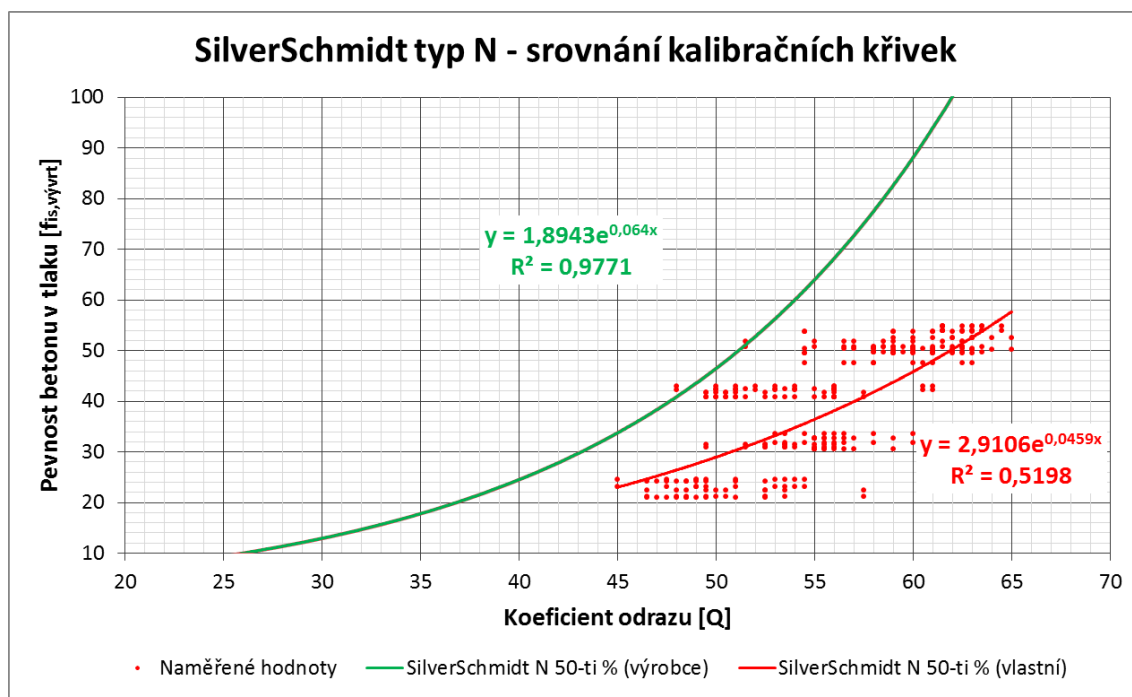


Obr. 4.13 Srovnání kalibračních křivek pro přístroj OriginalSchmidt typ N.

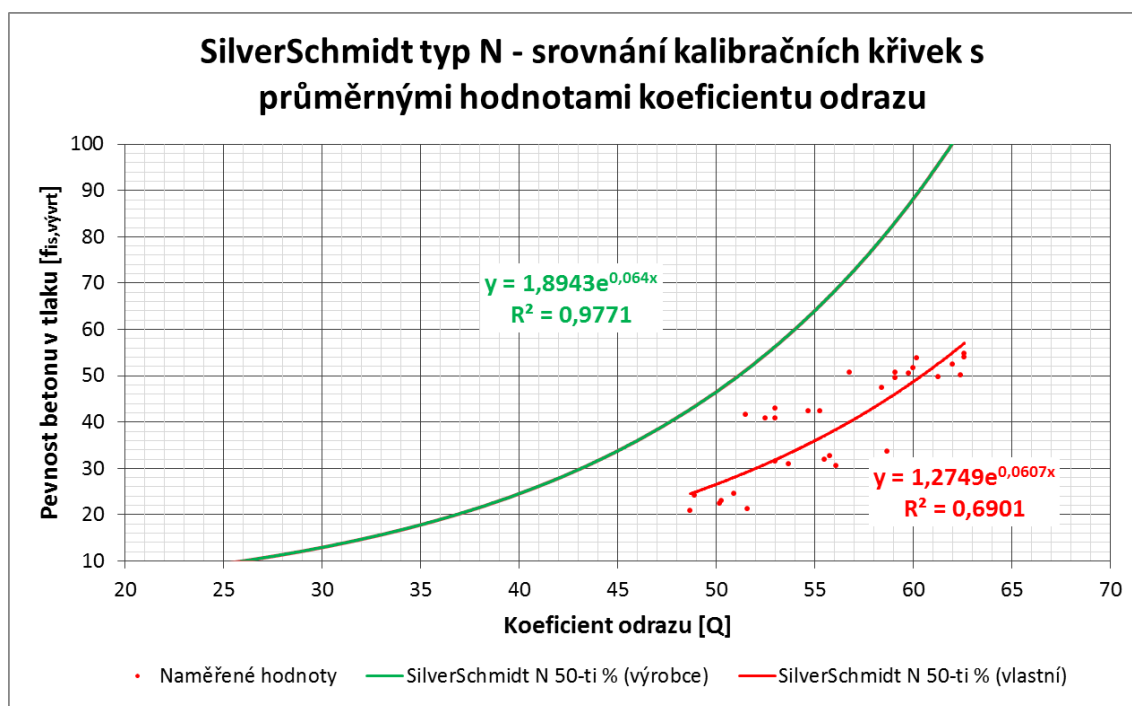


Obr. 4.14 Srovnání kalibračních křivek s průměrnými hodnotami odrazu pro přístroj OriginalSchmidt typ N.

4.4.2 SilverSchmidt typ N

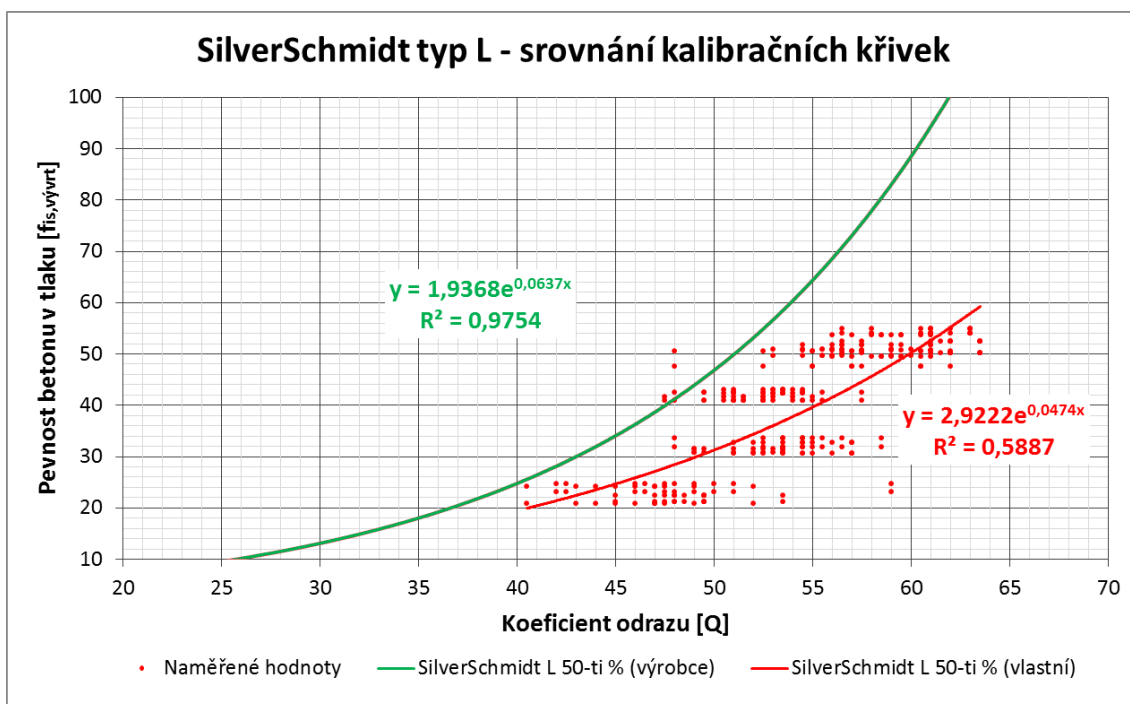


Obr. 4.15 Srovnání kalibračních křivek pro přístroj SilverSchmidt typ N.

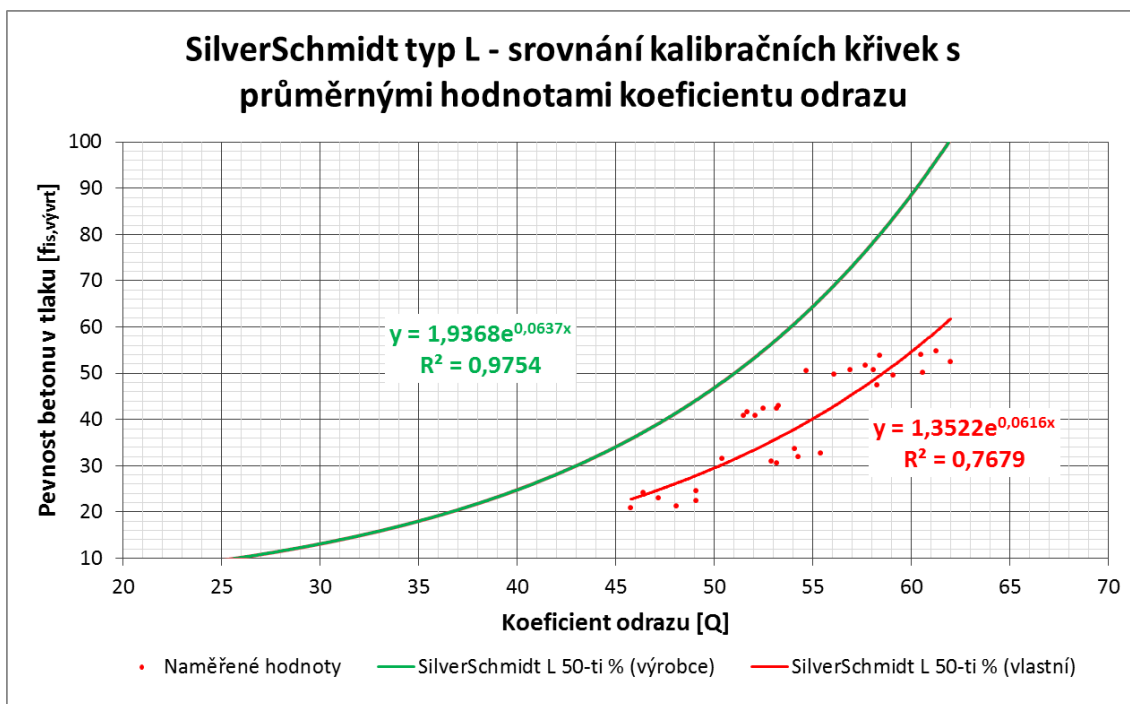


Obr. 4.16 Srovnání kalibračních křivek s průměrnými hodnotami koeficientu odrazu pro přístroj SilverSchmidt typ N.

4.4.3 SilverSchmidt typ L



Obr. 4.17 Srovnání kalibračních křivek pro přístroj SilverSchmidt typ L.



Obr. 4.18 Srovnání kalibračních křivek s průměrnými hodnotami koeficientu odrazu pro přístroj SilverSchmidt typ L.

5 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo seznámení se základními principy nedestruktivních metod a druhy tvrdoměrných přístrojů. Byly popsány základní pojmy a tvrdoměrné metody a jejich rozdělení.

V teoretické části byly popsány jednotlivé přístroje pro tvrdoměrné měření, jejich typy a vývoj tvrdoměrných metod pro zkoušení betonu a nejnovější přístroj SilverSchmidt. Jeho přínos spočívá v technologii měření, při odpadá nutnost korekce při různých směrech zkoušení a možnost zkoušet betony vysokých pevností. Díky připojení k softwaru, vyvinutého společností Proceq a množství funkcí oproti předchozímu typu lze odhadovat pevnosti přímo v přístroji.

Dále jsou vysvětleny metodiky zkoušení dle různých předpisů. Jedná se o metody ČSN a ČSN EN. Hlavní rozdíl mezi těmito dvěma metodikami spočívá v určování kalibrační křivky a způsobu upřesnění. ČSN EN požaduje 90% regresní křivku, zatímco u ČSN se jedná o 50% kalibrační křivku. Z toho vyplývá větší bezpečnost vztahu u normy ČSN EN, protože pod křivkou regresní závislosti leží pouze 10% hodnot měření.

V praktické části bylo prováděno zkoušení betonových dílců vyrobených v rámci řešení projektu GAČR 13-18870S. Bylo vyrobeno 15 betonových kvádrů, které byly zhotoveny z 5 receptur. Bylo prováděno měření pomocí tvrdoměrných přístrojů OriginalSchmidt N a SilverSchmidt typ N a typ L. Jejich naměřené hodnoty byly porovnány s výsledky na provedených jádrových vývrtech o průměru 100 mm a 75 mm. Následně bylo provedeno srovnání tvaru a sklonu vlastních křivek regresních závislostí s normovými křivkami pro přístroj OriginalSchmidt a křivkami od výrobce pro přístroj SilverSchmidt. Rozdílný sklon křivek je pravděpodobně důsledkem zkoušení betonu jiného složení než měl k dispozici tvůrce „kalibračních křivek“.

„Kalibrační křivky“ vytvořené v praktické části lze používat pro betony s typem kameniva 4-8 mm a 8-16 mm Olbramovice, písku 0-4 mm Bratčice a cementu CEM I 42,5 R (Mokrý), použité pro toto tvrdoměrné zkoušení.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ČSN 73 1370. *Nedestruktivní zkoušení betonu - Společná ustanovení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [2] ČSN 73 2011. *Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [3] SCHMID, Pavel. *Zkušebnictví a technologie: Modul BI02-M02 Stavební zkušebnictví* [online]. Brno: VUT v Brně, FAST, 2004 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <https://intranet.study.fce.vutbr.cz/studium/materialy/opory.asp>
- [4] ČSN EN 206-1. *Beton - Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [5] ZÁKLADNÍ PŘÍSTROJE PRO NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ. [Http://www.tzus.cz/en/](http://www.tzus.cz/en/) [online]. Technický a zkušební ústav stavební Praha [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: http://www.tzus.cz/data/editor/file/dokumenty/Proceq/mikula_pristroje_Proceq_kompletni_nabidka_08_11.pdf
- [6] PROCEQ SA: Schmidt Rebound Hammers - Original Schmidt. [Http://www.proceq.com/](http://www.proceq.com/) [online]. [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <https://www.proceq.com/compare/schmidt-rebound-hammers/>
- [7] PROCEQ SA: Schmidt Rebound Hammers - SilverSchmidt. [Http://www.proceq.com/](http://www.proceq.com/) [online]. [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <https://www.proceq.com/compare/schmidt-rebound-hammers/>
- [8] PROCEQ SA: Schmidt Rebound Hammers - DigiSchmidt. [Http://www.proceq.com/](http://www.proceq.com/) [online]. [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <https://www.proceq.com/compare/schmidt-rebound-hammers/>
- [9] PROCEQ SA: Schmidt Rebound Hammers - Schmidt OS-120. [Http://www.proceq.com/](http://www.proceq.com/) [online]. [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <https://www.proceq.com/compare/schmidt-rebound-hammers/>
- [10] ČSN EN 12504-2. *Zkoušení betonu v konstrukcích - Část 2: Nedestruktivní zkoušení - Stanovení tvrdosti odrazovým tvrdoměrem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [11] ČSN EN 13791. *Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích a v prefabrikovaných dílcích*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [12] ČSN 73 1373. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Tvrdoměrné metody zkoušení betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

- [13] CIKRLE, Petr a ANTON, Ondřej. Vývoj nedestruktivních metod pro zkoušení betonu od roku 1990. *BETON TKS*, 2015, roč. 15, č. 3, s. 3-7.
- [14] MARGOLDOVÁ, Jana. Úvodník. *BETON TKS*, 2013, roč. 13, č. 6, s. 2.
- [15] BROŽOVSKÝ, Jiří. Nedestruktivní zkoušení betonu odrazovými tvrdoměry v konstrukci podle Evropských norem a Českých technických norem. *BETON TKS*, 2010, roč. 10, č. 6, s. 75-79.
- [16] PCTE. *Schmidt Hammer* [online]. [cit. 2017-04-20].
Dostupné z: <http://pcte.com.au/images/NDT-Equipmentimages/SchmidtHammer/2.jpg>
- [17] Original Schmidt - Pictures. *PROCEQ SA*. [online]. [cit. 2016-04-20].
Dostupné z:
http://www.proceq.com/fileadmin/images/products/Concrete/Original_Schmidt/Press/Original_Schmidt_LR.jpg
- [18] Operating Instructions SilverSchmidt & Hammerlink. *PROCEQ SA*. [online]. [cit. 2017-04-20].
Dostupné z:
https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/SilverSchmidt_Operating%20Instructions_English_high.pdf
- [19] SCHMIDT CONCRETE TEST HAMMERS. *PROCEQ SA*. [online]. [cit. 2017-04-20].
Dostupné z:
https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/Schmidt%20Family_Sales%20Flyer_English_high.pdf
- [20] PCTE. *The SilverSchmidt Reference Curve* [online]. [cit. 2017-05-10].
Dostupné z:
<http://www.pcte.com.au/images/pdf/Silver%20Schmidt%20Hammer/The-SilverSchmidt-Reference-Curve.pdf>

6.1 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

A_d	<i>Zatěžovaná plocha jádrového vývrtu</i>	<i>[mm²]</i>
<i>BAM</i>	<i>Federální institut pro výzkum materiálů a testování v Berlíně</i>	
<i>ČSN</i>	<i>Česká technická norma</i>	
<i>ČSN EN</i>	<i>Česká verze evropské normy</i>	
d_n	<i>Průměr jádrového vývrtu</i>	<i>[mm]</i>
Φd	<i>Průměrná hodnota průměru jádrového vývrtu</i>	<i>[mm]</i>
e	<i>Eulerovo číslo</i>	
<i>EMPA</i>	<i>Švýcarská federální laboratoř pro materiálové testování a výzkum</i>	
<i>EN</i>	<i>Evropská norma</i>	
F_{MAX}	<i>Síla zatlačování, Síla na porušení vzorku</i>	<i>[kN]</i>
f_b	<i>Upřesněná pevnost betonu v tlaku</i>	<i>[MPa]</i>
f_{be}	<i>Pevnost betonu v tlaku s nezaručenou přesností</i>	<i>[MPa]</i>
f_{bei}	<i>Pevnost betonu v tlaku s nezaručenou přesností i-tého zkušební vzorku</i>	<i>[MPa]</i>
f_{bg}	<i>Pevnost betonu v tlaku se zaručenou přesností</i>	<i>[MPa]</i>
f_{bi}	<i>Pevnost betonu v tlaku i-tého zkušební vzorku</i>	<i>[MPa]</i>
f_{bj}	<i>Výsledná pevnost betonu v tlaku</i>	<i>[MPa]</i>
f_{bki}	<i>Pevnost betonu zjištěná upřesněnou zkouškou</i>	<i>[MPa]</i>
f_c	<i>Pevnost betonu v tlaku určená z kalibrační křivky</i>	<i>[MPa]</i>
f_{ck}	<i>Charakteristická pevnost betonu v tlaku</i>	<i>[MPa]</i>
$f_{ck,cube}$	<i>Charakteristická pevnost betonu v tlaku na zkušebních krychlích</i>	<i>[MPa]</i>
$f_{ck,cyl}$	<i>Charakteristická pevnost betonu v tlaku na zkušebních válcích</i>	<i>[MPa]</i>
$f_{ck,is}$	<i>Charakteristická pevnost betonu v tlaku v konstrukci</i>	<i>[MPa]</i>
f_{is}	<i>Pevnost betonu v tlaku v konstrukci pro vyšetřovaný beton</i>	<i>[MPa]</i>
$f_{is,nejmenší}$	<i>Nejnižší výsledek zkoušky betonu v tlaku v konstrukci</i>	<i>[MPa]</i>
$f_{is,vývrt}$	<i>Pevnost betonu v tlaku určená z jádrových vývrtů</i>	<i>[MPa]</i>
$f_{m(n)}$	<i>Aritmetický průměr z n výsledků zkoušek pevnosti betonu v tlaku v konstrukci</i>	<i>[MPa]</i>
f_R	<i>Pevnost betonu v tlaku zjištěná z kalibrační křivky</i>	<i>[MPa]</i>
Φf_R	<i>Průměr pevnosti betonu v tlaku z kalibrační křivky</i>	<i>[MPa]</i>
<i>HB</i>	<i>Tvrdost podle Brinella</i>	
<i>HJ</i>	<i>Tvrdost podle Janky</i>	
<i>HR</i>	<i>Tvrdost podle Rockwella</i>	

<i>HRC</i>	<i>Tvrđost určená diamantovým kuželem (C-cone) při celkovém zatížení 1500 N. Doporučuje se používat pro rozsah HRC 20-67.</i>
<i>HV</i>	<i>Tvrđost podle Vickerse</i>
<i>k₁</i>	<i>Součinitel závislý na počtu zkušebních dvojic</i>
<i>LCD</i>	<i>Displej z tekutých krystalů (liquid crystal display)</i>
<i>Mpa</i>	<i>SI jednotka tlaku (také N/mm²)</i>
<i>Nm</i>	<i>Newtonmetr, jednotka momentu síly</i>
<i>NTD</i>	<i>Nedestruktivní zkouška, metoda</i>
<i>PC</i>	<i>Osobní počítač (personal computer), SilverSchmidt propojitelný s PC</i>
<i>Q</i>	<i>Odrasový koeficient</i>
<i>ΦQ</i>	<i>Průměrná hodnota odrazového koeficientu</i>
<i>α</i>	<i>Hodnota odrazu (ČSN)</i>
<i>r</i>	<i>Součinitel korelace</i>
<i>r²</i>	<i>Součinitel determinace</i>
<i>s</i>	<i>Směrodatná odchylka</i>
<i>ST</i>	<i>Standardní model SilverSchmidt</i>
<i>USB</i>	<i>Univerzální sériová sběrnice (Universal Serial Bus)</i>
<i>A</i>	<i>Upřesňující součinitel</i>
<i>α_t</i>	<i>Součinitel závislý na stáří zkoušeného betonu</i>
<i>α_w</i>	<i>Součinitel závislý na vlhkosti zkoušeného betonu</i>
<i>β_n</i>	<i>Součinitel odhadu 5 % kvantilu</i>
<i>δf</i>	<i>Rozdíl mezi pevností jádrového vývrtu a pevností zjištěné ze základní křivky</i>
	<i>[MPa]</i>
<i>Δf</i>	<i>Posun základní křivky</i>
	<i>[MPa]</i>
<i>δf_{m(n)}</i>	<i>Střední hodnota (aritmetický průměr) rozdílů posunů</i>
<i>ζ</i>	<i>Korekční součinitel</i>
<i>ψ</i>	<i>Opravný součinitel</i>
<i>°C</i>	<i>Stupeň Celsia</i>

6.2 SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 2.1 Tvrdoměr OriginalSchmidt s mechanickou stupnicí hodnoty odrazu
- Obr. 2.2 Tvrdoměr OriginalSchmidt s jednotkou na zaznamenání hodnoty odrazu
- Obr. 2.3 Tvrdoměr SilverSchmidt s integrovaným displejem
- Obr. 2.4 Tvrdoměr DigiSchmidt se zobrazovací jednotkou
- Obr. 2.5 Tvrdoměr Schmidt OS – 120 PT s větším povrchem pístu
- Obr. 2.6 Tvrdoměr SilverSchmidt
- Obr. 2.7 Použití přístrojů s ohledem na rozsah pevnosti betonu.
- Obr. 2.8 Referenční kalibrační křivka SilverSchmidt typ N s odrazovým koeficientem Q na ose x a pevnosti betonu v tlaku na ose y
- Obr. 2.9 10% referenční kalibrační křivka SilverSchmidt typ N s odrazovým koeficientem Q na ose x a pevnosti betonu v tlaku na ose y [20].
- Obr. 2.10 Referenční kalibrační křivka SilverSchmidt typ L s odrazovým koeficientem Q na ose x a pevnosti betonu v tlaku na ose y
- Obr. 2.11 Referenční kalibrační křivka SilverSchmidt typ L s hříbovým pístem. Odrazový koeficient Q na ose x a pevnost betonu v tlaku na ose y
- Obr. 3.1 Zásada pro zjištění vztahu mezi pevností betonu v tlaku v konstrukci a údaji z nepřímé zkušební metody
- Obr. 3.2 Srovnání kalibračních křivek dle norem
- Obr. 4.1 Betonové kvádry a jádrové vývrtky zkušební sady s označením 0/3.
- Obr. 4.2 Tvrdoměrné měření přístroji OriginalSchmidt (obr. vlevo) a SilverSchmidt (obr. Vpravo).
- Obr. 4.3 Přístroj SilverSchmidt s digitálním ukazatelem koeficientu odrazu Q .
- Obr. 4.4 Čtení a zápis hodnot z displeje zkušební lisu.
- Obr. 4.5 Zkoušení jádrového vývrtu v lisu dle ČSN EN 12504-1 a zápis do protokolu
- Obr. 4.6 Optimální porušení jádrového vývrtu
- Obr. 4.7 Regresní závislost přístroje OriginalSchmidt typ N.
- Obr. 4.8 Regresní závislost přístroje SilverSchmidt typ N.
- Obr. 4.9 Regresní závislost přístroje SilverSchmidt typ L.
- Obr. 4.10 Regresní závislost z průměrných hodnot přístroje OriginalSchmidt typ N.
- Obr. 4.11 Regresní závislost z průměrných hodnot přístroje SilverSchmidt typ N.
- Obr. 4.12 Regresní závislost z průměrných hodnot přístroje SilverSchmidt typ L.
- Obr. 4.13 Srovnání kalibračních křivek pro přístroj OriginalSchmidt typ N.
- Obr. 4.14 Srovnání kalibračních křivek s průměrnými hodnotami odrazu pro přístroj OriginalSchmidt typ N.
- Obr. 4.15 Srovnání kalibračních křivek pro přístroj SilverSchmidt typ N.
- Obr. 4.16 Srovnání kalibračních křivek s průměrnými hodnotami koeficientu odrazu pro přístroj SilverSchmidt typ N.
- Obr. 4.17 Srovnání kalibračních křivek pro přístroj SilverSchmidt typ L.
- Obr. 4.18 Srovnání kalibračních křivek s průměrnými hodnotami koeficientu odrazu pro přístroj SilverSchmidt typ L.

6.3 SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 3.1</i>	<i>Součinitel k_1 závislý na počtu zkušebních dvojic</i>
<i>Tab. 3.2</i>	<i>Součinitel α_t</i>
<i>Tab. 3.3</i>	<i>Součinitel α_w</i>
<i>Tab. 4.1</i>	<i>Receptury betonových směsí</i>
<i>Tab. 4.2</i>	<i>Vlastnosti betonových směsí</i>
<i>Tab. 4.3</i>	<i>Výčet hodnot pro přístroj OriginalSchmidt typ N.</i>
<i>Tab. 4.4</i>	<i>Výčet hodnot pro přístroj SilverSchmidt typ N.</i>
<i>Tab. 4.5</i>	<i>Výčet hodnot pro přístroj SilverSchmidt typ L.</i>
<i>Tab. 4.6</i>	<i>Výpočet pevnosti v tlaku na jádrových vývrtech průměru 100 mm.</i>
<i>Tab. 4.7</i>	<i>Výpočet pevnosti v tlaku na jádrových vývrtech průměru 75 mm.</i>